

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Jednopolové poruchy v síti vn a nn
Single phase faults in MV and LV network

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Rohleder**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Jednopolové poruchy v síti vn a nn.**
Single phase faults in MV and LV networks.

Zásady pro vypracování:

1. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn
2. Teoretický rozbor vzniku jednopolových poruch
3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů
4. Možnosti lokalizace místa zemního spojení
5. Příklad výpočtu

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Toman, P.: Lokalizace místa zemního spojení v sítích VN, Brno, 2002

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**


Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2014



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7. 5. 2014

Luděk Kollecker
.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za poskytnuté cenné rady, připomínky a vedení bakalářské práce.

ABSTRAKT

V první části bakalářské práce se autor zabývá parametry venkovního, kabelového vedení vn a nn sítí. Parametry vedení jsou elektrické veličiny ovlivňující vlastnosti vedení, které jsou dány materiálem, průměrem vodičů, konstrukcí vedení a prostředím v okolí vodičů. Druhá část je věnována poruchovým stavům vyskytujících se v elektrických sítích. Hlavní bod bakalářské práce řeší možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů při jednopólové poruše a následnou lokalizaci proudů pomocí statických, dynamických metod, indikátorů poruch a dalších. V poslední praktické části jsou spočítány parametry smýšleného vedení a k němu navržena zhášecí tlumivka pro kompenzaci kapacitního proudu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zkratky, zemní spojení, lokalizace místa zemního spojení, kompenzace zemních kapacitních proudů.

ABSTRACT

In the first part of the bachelor thesis, the author examines the parameters of outdoor line, cable line of HV a LV networks. Parameters of the line are electrical variables affecting properties of the line, which are determined by material, diameter of conductors, line construction and the environment around the conductors. The second part is devoted to fault conditions occurring in electrical networks. The main point of the thesis is devoted to possibilities to compensate the earth capacitive currents at a single phase failure and it is subsequent localization by static, dynamic methods and by failure indicators and others. In the last part, parameters of an imaginary line are calculated and to this is designed arc suppression coil for compensation of capacitive current.

KEY WORDS

Shunt fault, earth fault, fault location in compensated network, earth fault current compensation.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Cu	chemická značka mědi
ČR	Česká republika
Fe	chemická značka železa
Mg	chemická značka hořčíku
nn	hladina nízkého napětí
PTN	měřicí transformátor napětí
PTP	měřicí transformátor proudu
PVC	polyvinylchlorid, umělá hmota
Si	chemická značka křemíku
tj	to jsou
tzv	takzvaný
UV	ultrafialové záření
vn	hladina vysokého napětí
vvn	hladina velmi vysokého napětí
π	Ludolfovo číslo s hodnotou přibližně 3,14

Ostatní symboly a zkratky se vyskytují v textu s jejich následným vysvětlením.

OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. ELEKTRICKÁ VEDENÍ	2
2.1 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	2
2.1.1... Vedení vn.....	2
2.1.2... Vedení nn.....	2
2.1.3... Vodiče pro venkovní vedení.....	3
2.1.3.1 Druhy vodičů	3
2.1.3.2 Konstrukce vodičů	3
2.1.3.3 Tvary vodičů.....	4
2.1.4... Elektrické parametry venkovního vedení.....	5
2.1.4.1 Rezistance vodičů venkovního vedení.....	6
2.1.4.2 Indukčnost venkovního vedení	8
2.1.4.3 Kapacita venkovního vedení.....	12
2.2 KABELOVÉ VEDENÍ	14
2.2.1... Vedení 22 kV.....	14
2.2.2... Vedení nn.....	14
2.2.3... Podélná impedance kabelových vedení	15
2.2.4... Příčná admitance kabelových vedení.....	15
2.2.5... Kapacity kabelových vedení.....	15
3. PŘECHODOVÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH.....	18
3.1 ZKRATY	18
3.1.1... Příčiny vzniku zkratu.....	18
3.1.2... Nebezpečné děje při zkratu.....	19
3.1.3... Rozdělení zkratů	19
3.2 ZEMNÍ SPOJENÍ.....	21
3.2.1... Sítě s izolovaným uzlem.....	23
3.2.1.1 Přerušované zemní spojení	25
3.2.1.2 Netočivé složky proudu a napětí zemního spojení v izolované soustavě	25
4. KOMPENACE ZEMNÍCH KAPACITNÍCH PROUDŮ	27
4.1 KOMPENZOVANÁ SÍŤ S UZLEM UZEMNĚNÝM PŘES ZHÁŠECÍ TLUMIVKU.....	27
4.1.1... Netočivé složky proudu a napětí během zemního spojení v kompenzovaných soustavách.....	28
4.1.2... Zhášecí tlumivka a rezonanční křivka	29
4.2 SÍŤ UZEMNĚNÉ PŘES ODPORNÍK.....	30
4.3 SYSTÉM RCC	32
5. LOKALIZACE MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ	33
5.1 STATICKE METODY PRO IZOLOVANÉ SOUSTAVY.....	33
5.2 STATICKE METODY PRO KOMPENZOVANÉ SOUSTAVY	34
5.3 DYNAMICKÉ METODY PRO KOMPENZOVANÉ SOUSTAVY	37
5.4 LOKALIZACE PORUCHY V SÍTÍCH PROVOZOVANÝCH PŘES ODPORNÍK.....	39
5.5 LOKALIZACE POSTIŽENÉHO VÝVODU	40

6. PŘÍKLAD VÝPOČTU	41
6.1 VÝPOČET PARAMETRŮ VEDENÍ	41
6.2 VÝPOČET PARAMETRŮ TLUMIVKY	43
7. ZÁVĚR.....	44
SEZNAM OBRÁZKŮ	45
SEZNAM TABULEK.....	47
SEZNAM PŘÍLOH	48
LITERATURA.....	54

1. ÚVOD

Elektrizační soustava se skládá z výroby elektrické energie, přenosu a rozvodu k místům spotřeby. Základním spojovacím prvkem mezi elektrárnami a elektrizační soustavou jsou elektrické stanice, jejichž úkolem je transformovat napětí na určitou hladinu, rozdělovat dodávku do všech napětíových úrovní. Elektrizační soustavu můžeme rozdělit na přenosové a distribuční sítě. Přenosové sítě jsou tvořeny vedením o napětíové hladině 400 kV a 220 kV. Do distribučních sítí zahrnujeme venkovní i kabelová vedení s napětím 3, 6, 10 kV, jenž jsou v dnešní době postupně nahrazovány napětíovou hladinou 22 kV, 35 kV.

Pro zjištění matematického modelu vedení vycházíme z dvojbranu, který je složen z podélné impedance a příčné admitance. Složky podélné impedance tvoří rezistence a indukčnost. Příčnou admitanci představuje svod, který ve výpočtech vn, nn sítí zanedbáváme a kapacita vedení.

Při provozu elektrizačních sítí mohou vzniknout nebezpečné poruchy ohrožující chod sítě a následně i celé soustavy. Mezi nejčastější poruchové stavy na vedení patří zkrat, zemní spojení a přepětí. Vznik těchto poruch může být zapříčiněn atmosférickými vlivy, chybou obsluhy nebo důsledkem poruchy nějakého zařízení, proto je nezbytné použití indikátorů a ochran, jejichž cílem je rozlišit druh poruchy, indikace poruchové části vedení a následně ji v co nejkratší době odpojit.

2. ELEKTRICKÁ VEDENÍ

Elektrická vedení jsou součástí přenosových i distribučních sítí, definována jako soubor izolačních materiálů, vodičů, konstrukcí určených pro přenos a rozvod elektrické energie mezi dvěma body elektrické sítě, mezi jejími uzly. Elektrická vedení lze rozdělit na venkovní a kabelová. Použití venkovního a kabelového vedení je dáno nejen místními topografickými či technickými podmínkami, ale také je závislé na bezpečnostních požadavcích a spolehlivosti provozu vedení [1].

2.1 Venkovní vedení

Převážnou většinu venkovního vedení tvoří holé vodiče, které jsou taženy nad terénem. Tyto vodiče jsou přichyceny ke stožárům pomocí izolátorů. Při výstavbě nových vedení se více preferují, i když náklady na provoz a údržbu jsou vyšší než u kabelového vedení. Za klíčový důvod se považují nižší investiční náklady. V ČR lze venkovní vedení rozdělit dle hladiny na vedení vvn, vn, nn [1].

2.1.1 Vedení vn

Sítě vn dosahují kratších délek než rozvodné vvn vedení, využívají se pro přenos elektrické energie do míst spotřeby, jako jsou obce, průmyslové oblasti, města. Nejčastěji se provozují jako paprskové sítě o napěťové hladině 22 kV a 35 kV [1].

Distribuční síť je charakterizována vyšší hustotou zástavby, tudíž i dopad na životní prostředí je výraznější. Především se jedná o změnu estetického rázu krajiny, dopad na faunu a flóru. Při návrhu vedení platí zásada, že krajina je nadřazená a technické dílo se jí musí přizpůsobit.

Venkovní vedení je rozděleno:

- Hlavní, taženo mezi spínacími stanicemi, propojuje hlavní vedení příčně.
- Přípojky, slouží k připojení distribučních trafostanic [2].

2.1.2 Vedení nn

Napětí 400 V je nejnižší používaná hladina v rozvodné soustavě. Přenosová schopnost je především limitována úbytkem napětí na vedení. Sítě nn se vyskytují zejména v malých obcích s řídkou zástavbou [1].

2.1.3 Vodiče pro venkovní vedení

Volba vodiče pro venkovní vedení je navrhována jak po stránce elektrické, tak i mechanické. Při návrhu hledáme ekonomické optimum pro elektrické vlastnosti, přičemž na vodič jsou kladeny tyto požadavky:

- nízké pořizovací náklady,
- malý elektrický odpor,
- odolnost proti chemickým vlivům,
- velká pevnost,
- malá hmotnost z pohledu zatížení nosných částic,
- malý průměr z pohledu atmosférickým jevů.

Vodiče pro venkovní vedení se nejčastěji vyrábějí z hliníku nebo mědi, používají se jako dráty, lana a závěsné kabely [3].

2.1.3.1 Druhy vodičů

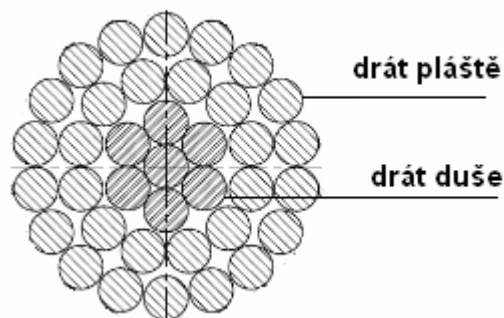
Nejrozšířenějšími vodiči pro přenos elektrické energie jsou, AlFe lana. V poslední době se objevují nové typy vodičů na bázi nejrůznějších slitin. Převážně se jedná o slitiny hliníku, (hliník – hořčík – křemík), které vykazují dobrou vodivost i mechanickou pevnost, jejichž úkolem je zvýšit přenosové vlastnosti vodičů. Mezi legující prvky patří Mg 0,4 – 0,9 %, Fe < 0,7 %, Cu < 0,5 % a Si 0,3 – 0,7 % [4].

2.1.3.2 Konstrukce vodičů

Lana prostá, jsou používána pro silová vedení všech napětí. Výroba se provádí zkrucováním jednotlivých vrstev drátů a to tak, že každá následující vrstva je navíjena opačným směrem, aby se lana nerozplétala. Oproti drátu má lana větší hmotnost, větší elektrický odpor, menší pevnost, indukčnost a menší modul pružnosti. Hlavní výhodou je lepší ohebnost, bezpečnější provoz.

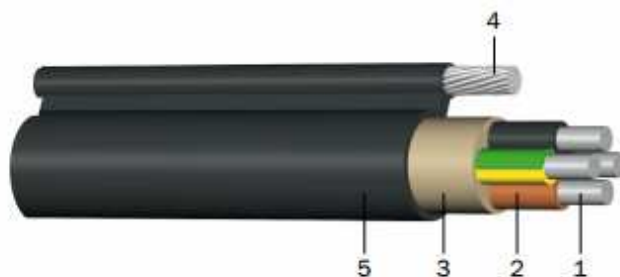
Lana kombinovaná, jsou zkonstruována ze dvou materiálů. První se vyznačuje velkou elektrickou pevností, tvoří nosnou část lana, tzv. duši lana, nejčastěji se používá ocel Fe. Druhý materiál má velkou elektrickou vodivost, tvoří elektrovednou část lana, nazývá se plášť. Převážně se jedná o kombinaci hliníku s ocelovou duší, AlFe, a slitin hliníku s ocelovou duší [3].

Lana válcovaná, se po slánění válcují nebo protáhnou průvlakem. Jejich povrch se blíží lanům z profilových drátů. Tímto procesem je dosaženo snížení gradientu elektrického pole, snížení koróny [4].



Obr. 1: AlFe lano [4]

Závěsné kabely, jsou aplikovány zejména v sítích nn, kde nahrazují klasické přípojky. Z konstrukčního hlediska jsou závěsné kabely tvořeny hliníkovými vodiči, které mají ve společné izolaci ještě přiděleno nosné ocelové lano [3].

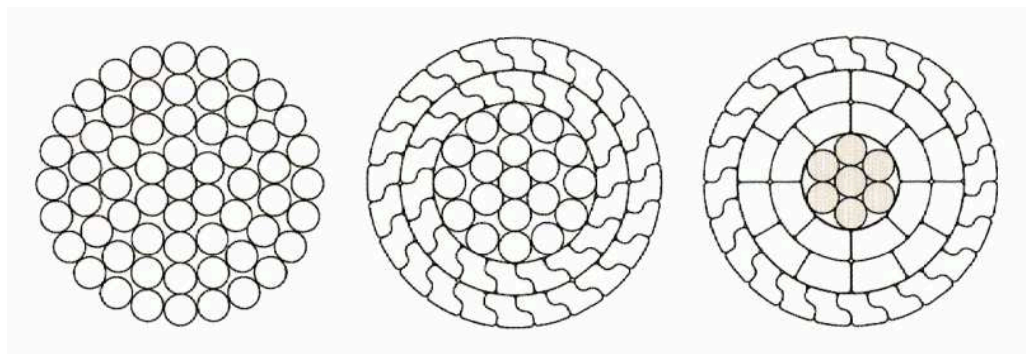


Obr. 2: Závěsný kabel [5]

- 1 - Al jádro,
- 2 - izolace PVC,
- 3 - obal, výplňová guma,
- 4 – lano,
- 5 - plášť PVC odolný proti UV záření.

2.1.3.3 Tvary vodičů

Vodiče neboli lana venkovního vedení jsou zkonstruována zkrucováním jednotlivých vrstev drátů kruhového průřezu, tím dochází ke vzniku dutin v průřezu lana (obr. 3). Použitím tvarovaných drátů lichoběžníkového tvaru nebo tvaru písmene „Z“ lze dosáhnout zvětšení poměru kovu vůči vzduchu. To má za následek nižší odpor než vodič kruhového průřezu se stejným vnějším průměrem. Vodiče vyrobené z tvarovaných drátů budou mít větší hmotnost a tedy i větší zatížení stožárů, naopak lze dosáhnout snížení průřezu vedení [4].



Obr. 3: Tvary vodičů [4]

2.1.4 Elektrické parametry venkovního vedení

Mezi základní primární parametry venkovního vedení patří rezistance, indukčnost, konduktance, kapacita, nejčastěji se udávají na jednotku délky vedení [6].

Jednotlivé parametry závisí na vzdálenosti mezi vodiči jednotlivých fází, průřezu vodiče jedné fáze, vzdálenosti mezi vodiči a zemí, vodiči a zemnicími lany, tvaru stožáru, konstrukci kabelu, druhu izolace, uložení a profilových tvarů vodiče [7].

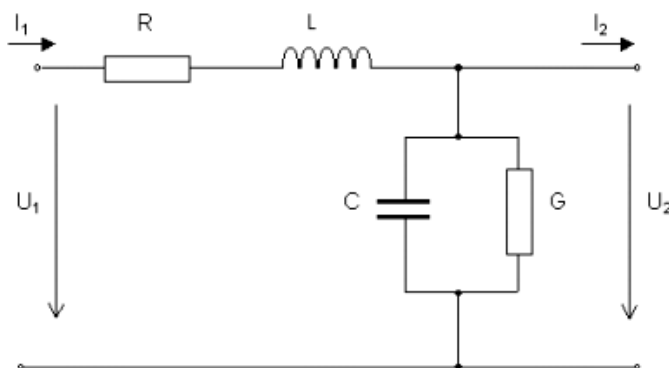
Rezistance R a induktivní reaktance X_p tvoří podélnou impedanci vedení, která je dána vztahem:

$$\bar{Z} = R + jX_p \quad [\Omega]. \quad (1)$$

Konduktance G a kapacitní susceptance B tvoří příčnou admitanci, která se určí pomocí vztahu:

$$\bar{Y} = G + jB \quad [\text{S}] [6]. \quad (2)$$

Při výpočtech parametrů vedení konduktanci uvažujeme pouze u sítí vvn.



Obr. 4: Jednofázový model vedení s parametry [8]

2.1.4.1 Rezistance vodičů venkovního vedení

Při ustáleném stejnosměrném proudu a ustálené teplotě vodiče se rezistance stanovuje pomocí měrného odporu vodiče, jmenovitého průřezu a délky vedení [6].

$$R_{ss} = \frac{\rho_0 \cdot l}{S} \quad [\Omega], \quad (3)$$

kde ρ_0 měrný elektrický odpor, obvykle se udává při teplotě 20 °C [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$],
 S průřez vodiče [mm^2],
 l délka vodiče [m].

Výše uvedený vztah je ve většině případů dostatečně přesný i pro střídavé obvody [7].

Tab. 1: Hodnoty rezistance při 20 °C [7]

Materiál	ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)
Cu	0,01786
Al	0,02941

Výsledná hodnota rezistance je dána následujícími přídatnými vlivy, které lze vyjádřit násobnými koeficienty:

$$R = R_{ss} \cdot k_v \cdot k_s \cdot k_1 \cdot k_p \quad [\Omega], \quad (4)$$

- k_v respektuje změnu rezistance vlivem teploty (oteplení),

$$k_v = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_{20}) + \beta(\vartheta - \vartheta_{20})^2 \quad [-], \quad (5)$$

kde α, β jsou teplotní součinitelé [K^{-1}], [K^{-2}],
 ϑ uvažovaná teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 ϑ_{20} teplota 20 °C.

Člen $\beta(\vartheta - \vartheta_{20})^2$ lze zanedbat při oteplení 100 °C u vodičů Cu, Al, AlFe [6].

Tab. 2: Teplotní součinitelé odporu [7]

Materiál	α [K^{-1}]	β [K^{-2}]
Cu	0,00393	$0,45 \cdot 10^{-6}$
Al	0,004	$1,1 \cdot 10^{-6}$

Při uvažování teploty vodiče 40 °C je $k_v = 1,08$ [7].

- **k_s respektuje vliv skinefektu**, je to děj, při kterém dochází k vytlačování střídavého proudu k povrchu vodiče, (neboli nerovnoměrné rozložení střídavého proudu po průřezu vodiče). Způsobuje zvětšení rezistance v porovnání s odporem pro stejnosměrný proud. Pro výpočet vodiče kruhového průřezu lze stanovit vztah, který vychází z Besselových funkcí. Zavedeme-li parametr m :

$$m = \frac{r}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu\omega}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\mu f}{2R_{ss}}} \quad [-], \quad (6)$$

kde r poloměr [m],
 μ permeabilita [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$],
 ω úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],
 ρ_0 měrný elektrický odpor při teplotě ϑ_0 [$\Omega \cdot \text{m}$],
 f frekvence [Hz],
 R_{ss} rezistivita při stejnosměrném proudu na jednotku délky [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$].

Pro nemagnetické materiály lze pro činitel k_s psát zjednodušené vztahy:

$$m \leq 1,2 \quad k_s = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} \quad [-], \quad (7)$$

$$m > 1,2 \quad k_s = 0,25 + 0,708m + \frac{0,06625}{m} \quad [-]. \quad (8)$$

Pro vodiče z feromagnetických materiálů platí:

$$m \leq 2 \quad k_s = 1 + 0,85m^2 - 0,3m^3 + 0,05m^4 \quad [-], \quad (9)$$

$$m > 2 \quad k_s = 1,4m \quad [-], \quad (10)$$

kde m se určí podle vztahu (6).

Činitel k_s pro AlFe lana je závislý na počtu vrstev Al na lanu Fe. Při jedné vrstvě Al vodiče na Fe lanu k_s závisí na velikosti proudu a permeabilitě. U lan, která jsou tvořena větším počtem Al vrstev, lze použít vztah pro dutá lana:

$$k_s = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-12} \left[\frac{(r_2 - r_1)f}{r_2 R_{ss}} \right]^2 \quad [-], \quad (11)$$

kde r_2 a r_1 jsou vnější a vnitřní poloměry Al vrstvy [m],
 f frekvence [Hz],
 R_{ss} rezistivita stejnosměrného proudu [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$].

Při průmyslovém kmitočtu je zvýšení rezistance hliníkových vodičů zanedbatelné, nepředstavuje více než 1,5 %, u měděných vodičů 1 % [6].

- **k_l respektující kroucení vodičů v laně**, způsobuje zvětšení rezistance oproti plnému vodiči stejné osové délky. Oxidy a nečistoty vytvoří velký přechodový odpor mezi povrchy dílčích vodičů. Tím dochází k rozdělení proudu na jednotlivé dílčí vodiče lana

o průměru d a prochází šroubovicí. Činitel zvětšení rezistance kroucením vodičů je dán poměrem délky závitu šroubovice k její výšce a_n měřené v ose.

$$k_1 = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2} \pi^2}{a_n} \quad [-], \quad (12)$$

kde a_n výška závitu šroubovice [m],

D_n průměr lana [m],

d průměr vodiče [m] [6].

Pro přesné určení vlivu je třeba znát konkrétní lano, hodnota koeficientu je přibližně $k_1 = 1,02$ [7].

- k_p **respektuje průhyb závěsného vodiče,**

$$k_p = \frac{l_p}{a} \quad [-], \quad (13)$$

kde l_p délka prohnutého vodiče je dána vztahem $l_p = 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c}$, (14)

a rozpětí stožárů [m],

c parametr řetězovky [m] [6].

U stožárů s rozpětím 100 m je přibližně $k_p = 1,0004$, s rozpětím 200 m 1,0016.

Celkový násobný koeficient pro výše uvedené úpravy by byl 1,11. Nejvíce rezistanci ovlivňuje teplota vodiče.

V případech, kdy se země používá jako vodič proudu, je nutné uvažovat i s jejím odporem R_g , který je dán vztahem:

$$R_g = \pi^2 f \cdot 10^{-7} \quad [\Omega \cdot m^{-1}], \quad (15)$$

kde f frekvence [Hz] [7].

2.1.4.2 Indukčnost venkovního vedení

Proudy procházející vedením vytváří kolem vodičů elektromagnetická pole, vzájemné působení těchto magnetických polí se nazývá indukčnost vedení. Časově proměnné proudy způsobují střídavé magnetické pole. U vícevodičových vedení působí účinky magnetického pole na okolní vodiče (vzájemná indukčnost) i na vodič samostatný (vlastní indukčnost) [13].

Pro vlastní indukčnost platí:

$$L = 0,46 \log \frac{2l}{r} - 0,15 \quad [mH \cdot km^{-1}], \quad (16)$$

kde r, l poloměr a délka vodiče [m].

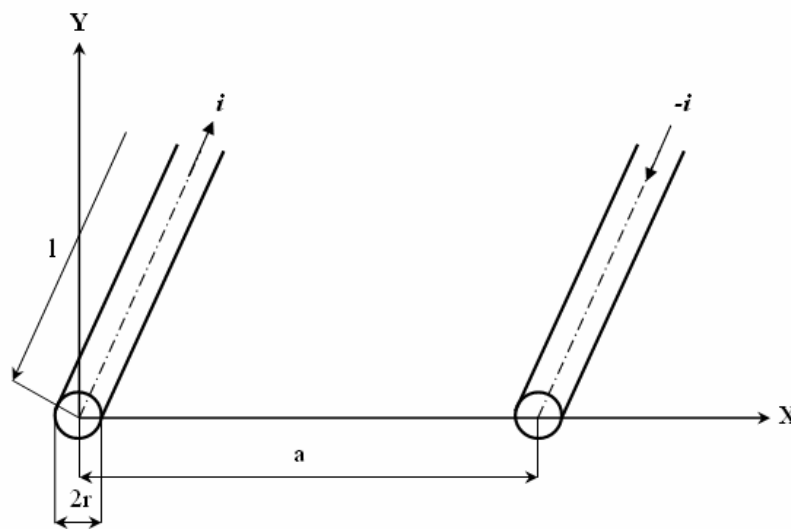
Pro vzájemnou indukčnost lze odvodit vztah:

$$M = 0,46 \log \frac{2l}{a} - 0,2 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (17)$$

kde a vzdálenost mezi vodiči [m] [14].

- **Jednoduché dvouvodičové vedení**

Proudový obvod je vytvořen dvěma vodiči s proudem i , velikosti proudů jsou shodné, ale opačného směru. Vodiče mají kruhový průřez s poloměrem r , osovou vzdáleností $a \gg r$ a délkou smyčky vodičů $l \gg a$ [13].



Obr. 5: Dvouvodičové vedení [13]

Elektromotorická síla na jednom vodiči je dána vztahem:

$$e = -L \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} = (-L + M) \frac{di_1}{dt} = -L_c \frac{di_1}{dt} \quad [\text{V}]. \quad (18)$$

Z toho plyne vztah pro indukčnost jednoho vodiče:

$$L_c = L - M = \left(0,46 \log \frac{2l}{r} - 0,15 \right) - \left(0,46 \log \frac{2l}{a} - 0,2 \right), \quad (19)$$

$$L_c = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (20)$$

kde a osová vzdálenost vodičů [m],

r poloměr vodičů [m] [14].

- **Jednoduché trojfázové vedení symetrické**

Předpokládáme, že součet všech proudů v každém okamžiku je roven nule. Vodiče fází jsou vyrobeny z téhož materiálu, mají stejný průřez a jsou umístěny ve vrcholech rovnoramenného trojúhelníka o straně a . Vzájemné indukčnosti M mezi všemi vodiči jsou stejné.

Elektromotorickou sílu lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$e = -L \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_3}{dt} = -L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = -L_C \frac{di_1}{dt} \quad [\text{V}]. \quad (21)$$

Celková indukčnost jednoho vodiče:

$$L_C = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad [14]. \quad (22)$$

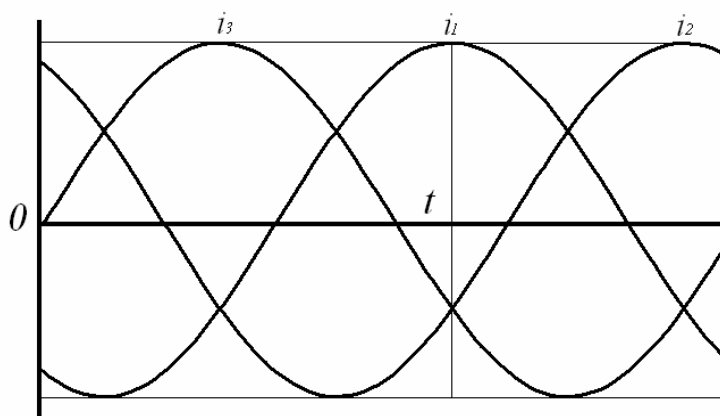
- **Jednoduché trojfázové vedení nesymetrické**

Opět platí předpoklad, že součet všech proudů v každém okamžiku je roven nule. Vodiče jsou induktivně ovlivňovány magnetickým tokem samotného vodiče a dvěma toky sousedních vodičů. Dále je nutné pro odvození uvažovat časový průběh trojfázového proudu (obr. 6), kde je vybrán okamžik t , proud i_1 je maximální.

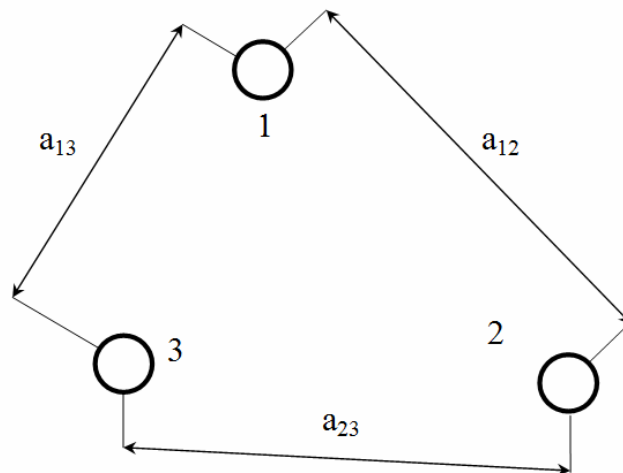
$$-i_1 = i_2 + i_3, \quad i_2 = i_3 = -\frac{i_1}{2} \quad [\text{A}]. \quad (23)$$

Potom pro elektromotorické napětí jednoho vodiče platí:

$$\begin{aligned} e &= -L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{12} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{13} \frac{di_1}{dt} = -\left(L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13} \right) \frac{di_1}{dt} = \\ &= -L_{C1} \frac{di_1}{dt} \quad [\text{V}]. \end{aligned} \quad (24)$$



Obr. 6: Průběh trojfázového proudu [14]



Obr. 7: Trojfázové vedení nesymetrické [13]

Provozní indukčnost jednotlivých vodičů trojfázového nesouměrného vedení je dána vztahy:

$$L_{C1} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{13}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (25)$$

$$L_{C2} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (26)$$

$$L_{C3} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (27)$$

Každý vodič nesymetrického vedení má jinou hodnotu indukčnosti, proto se v praxi nejčastěji udává střední indukčnost vedení, která je dána aritmetickým průměrem jednotlivých indukčností.

$$L_{Cstř} = \frac{1}{3}(L_{C1} + L_{C2} + L_{C3}) = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05, \quad (28)$$

$$L_{Cstř} = 0,46 \log \frac{a_s}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}],$$

kde a_{12}, a_{13}, a_{23} vzdálenosti jednotlivých vodičů [m],

a_s střední vzdálenost vodičů [m],

r poloměr vodičů [m] [14].

2.1.4.3 Kapacita venkovního vedení

Kolem vodiče s proudem se vytváří elektrické pole, zpětný vliv elektrického pole působícího v prostoru vedení napětím mezi vodiči se nazývá kapacita vedení. Časově proměnná napětí způsobují střídavé elektrické pole. U vícevodičových vedení ovlivňují účinky elektrického pole samotný vodič i vodiče okolní.

Při odvození kapacity vedení vycházíme ze vztahu pro elektrický potenciál.

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad [\text{V}], \quad (29)$$

kde Q náboj vodiče [$\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$],

ϵ permitivita [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$],

ρ vzdálenost od vodiče [m],

ρ_0 vzdálenost od vodiče, ve kterém se předpokládá nulový potenciál [m] [14].

• Jednoduché dvouvodičové vedení

Oba vodiče mají stejný poloměr r , přičemž platí, že $r \gg d$, vzdálenost středů. Vodič A má náboj Q , vodič B má náboj $-Q$.

Pro potenciály vodičů A, B platí vztahy:

$$U_A = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d}{r} \quad [\text{V}], \quad (30)$$

$$U_B = -\frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{r} + \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{d} \quad [\text{V}]. \quad (31)$$

Napětí mezi vodiči je dáno rozdílem potenciálů:

$$U = U_A - U_B = \frac{Q}{\pi\epsilon} \ln \frac{d}{r} \quad [\text{V}]. \quad (32)$$

Provozní kapacita vedení je dána vztahem:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{1}{\frac{1}{\pi\epsilon} \ln \frac{d}{r}} = \frac{1}{36 \ln \frac{d}{r}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (33)$$

Výsledný vztah pro kapacitu jednoho vodiče:

$$C_A = 2C = \frac{1}{18 \ln \frac{d}{r}} = \frac{0,0242}{\log \frac{d}{r}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (34)$$

kde d střední vzájemná vzdálenost vedení [m],

r poloměr [m] [14].

- **Trojfázové vedení**

Pro určení kapacity vedení je opět nutné uvažovat časový okamžik t , ve vodiči 1 je maximální proud (obr. 6). Budeme předpokládat, že se jedná o nesymetrické vedení se vzdáleností mezi vodiči d_{xy} . Pak lze pro elektrické náboje napsat vztah:

$$Q = Q_1, Q_2 = Q_3 = -\frac{Q}{2} \quad [\text{C} \cdot \text{m}^{-1}]. \quad (35)$$

Elektrický potenciál na povrchu vodiče 1 je dán vztahem:

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{12}} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{13}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r} \quad [\text{V}]. \quad (36)$$

Pro kapacitu jednotlivých vodičů platí:

$$C_1 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (37)$$

$$C_2 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{23}}}{r}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (38)$$

$$C_3 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{23}}}{r}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (39)$$

Stejně jako u indukčnosti každý vodič má jinou hodnotu kapacity, proto se nejčastěji udává střední kapacita vedení, která je dána aritmetickým průměrem jednotlivých kapacit vodičů.

$$C_{stř} = \frac{1}{3} (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}}{r}} = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s}{r}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (40)$$

kde d_s střední vzdálenost vodičů [m],

d_{12}, d_{13}, d_{23} vzdálenosti jednotlivých vodičů [m] [14].

- **Trojfázové vedení s uvažováním vlivu země**

Pro výpočet je nutné zadat výšku vodičů nad zemí (a, b, c) a vzdálenost vodičů od zrcadlových obrazů D_{xy} .

Elektrický potenciál vodiče 1:

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2a\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r\sqrt{D_{12} \cdot D_{13}}} \quad [\text{V}]. \quad (41)$$

Pro kapacitu vodičů platí:

$$C_1 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}} 2a}{r \sqrt{D_{12} \cdot D_{13}}}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (42)$$

$$C_2 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{23}} 2a}{r \sqrt{D_{12} \cdot D_{23}}}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (43)$$

$$C_3 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{23}} 2a}{r \sqrt{D_{13} \cdot D_{23}}}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}]. \quad (44)$$

Střední kapacita je opět dána aritmetickým průměrem všech kapacit vodičů.

$$C_{stř} = \frac{1}{3}(C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s 2m}{r D_s}} = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s 2m}{r D_s}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (45)$$

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad [\text{m}], \quad (46)$$

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} \quad [\text{m}], \quad (47)$$

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad [\text{m}] \quad [14]. \quad (48)$$

2.2 Kabelové vedení

Kabelová vedení se využívají tam, kde nelze z klimatických, prostorových důvodů použít venkovní vedení. Investiční náklady těchto vedení jsou značně vyšší oproti venkovním vedením [1].

2.2.1 Vedení 22 kV

Vedení 22 kV jsou nejčastěji zastoupeny v průmyslových, městských rozvodech jako okružní síť. Pro toto napětí se používají trojfázové kabely. Každá žíla je opatřena kovovou fólií nebo olověným pláštěm, posléze celý kabel má společný olověný plášť nebo další krycí obaly [6].

2.2.2 Vedení nn

Vedení 400 V se provozuje k rozvodu elektrické energie od transformátorů 22/04 kV až do přípojkové skříně odběratele. Kabelová vedení jsou zapojena do okružního vedení

rozpojeného na jednotlivé paprsky [1]. U napětí 230/400 V se nejčastěji používají trojfázové kabely, kde jsou vodiče opatřeny izolací převážně z PVC nebo polyetylénu. Tyto izolované vodiče, žíly se pak slaní, opatří společnou izolací a případně podle druhu se kabely vyztuží kovovým obalem, pancířem proti mechanickému případně chemickému poškození [6].

2.2.3 Podélná impedance kabelových vedení

Taktéž u kabelových vedení je podélná impedance tvořena rezistancí R a induktivní reaktancí X_p . Trojfázový kabel předpokládáme jako geometricky souměrné vedení.

Rezistance se určí stejným způsobem jako u venkovního vedení. Neuvažujeme průhyb vodiče, ale místo toho se musí respektovat zvětšení rezistance u střídavého proudu vlivem existence kovového pláště nebo pancíře. Do těchto tzv. přídatných ztrát zahrnujeme ztráty vířivými proudy, hysterezí a vlivem jevu blízkosti. Tyto vlivy jsou matematicky těžko vyjádřitelné, proto se dodává přídatná rezistence ΔR , která udává skutečné hodnoty, pak pro rezistanci platí:

$$R = R_{\Sigma} + \Delta R \quad [\Omega], \quad (49)$$

kde R_{Σ} je rezistance při střídavém proudu bez vlivu pláště a jevu blízkosti. Přídatná rezistance ΔR se s průřezem zvětšuje a taktéž závisí na jmenovitém napětí a typu kabelu. Pro výslednou rezistanci platí:

$$R = R_{ss} \cdot k_v \cdot k_s \cdot k_l + \Delta R \quad [\Omega] \quad [6]. \quad (50)$$

Hodnoty induktivní reaktance na kilometr délky udává výrobce. Obecně platí, že indukčnost kabelů je menší než venkovního vedení stejné napěťové hladiny [14]. U domovních rozvodů, kde jsou použity malé průřezy vodičů, lze vliv reaktance zcela zanedbat [6].

2.2.4 Příčná admitance kabelových vedení

Příčná admitance se skládá z konduktance G a kapacitní susceptance B . Různorodost konstrukčního uspořádání vodičů a izolačních materiálů způsobuje různé hodnoty v jednotlivých případech [6].

2.2.5 Kapacity kabelových vedení

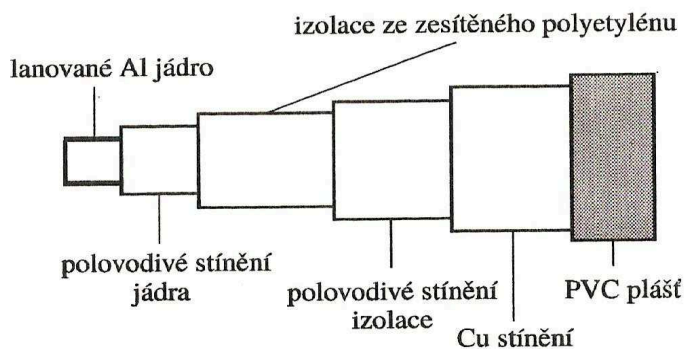
Základní rozdělení kabelů:

1. Jednožilové a vícežilové s vlastním kovovým obalem každé žíly.
2. Vícežilové se společným kovovým pláštěm pro všechny žíly.

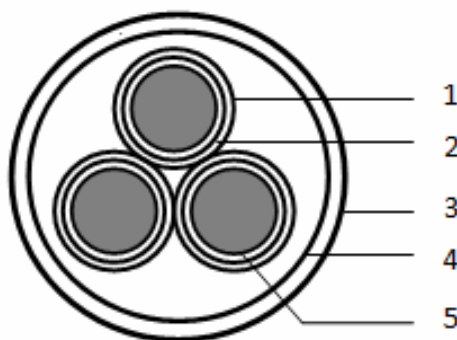
Kabely bodu 1. se dále dělí na jednožilové, trojplášťové s olověným pláštěm na každé žíle a stíněné s kovovou fólií nebo pokoveným papírem na každé žíle. Všechny tyto kabely mají jedinou kapacitu, která je dána kapacitou vodiče proti plášti.

$$C_p = \frac{0,0242 \cdot \varepsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (51)$$

kde ε_r poměrná permitivita mezi vodičem a kabelem,
 r_1 poloměr vodiče [cm],
 r_2 vnitřní poloměr kovové obálky [cm] [6].



Obr. 8: Jednožilový kabel [2]



Obr. 9: Trojplášťový kabel s olověným pláštěm na každé žíle [6]

1 – olověný plášť, 2 – izolace vodiče, 3 – izolace kabelu, 4 – ocelový pancíř, 5 – vodič

Obecně platí, že kapacita kabelů je větší než kapacita venkovního vedení stejné napěťové hladiny. Vztahy pro výpočet kapacity kabelů jsou velmi složité a závislé na typu kabelu, proto pokud kapacitu kabelů neudává výrobce, určí se měřením nabíjecího proudu. Nabíjecí proud je proud, který teče do kabelu při stavu naprázdno, pak výsledná kapacita je dána vztahem:

$$C = \frac{I_{NAB}}{2\pi f l U_f 10^{-6}} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}], \quad (52)$$

kde I_{NAB} nabíjecí proud [A],
 f frekvence sítě [Hz],
 l délka vedení [km],
 U_f fázové napětí vedení [V] [14].

3. PŘECHODOVÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH

Vznik přechodných jevů v elektrizačních soustavách je podmíněn přechodem z jednoho ustáleného stavu do druhého. Přechodné jevy mohou být způsobeny nesprávnou manipulací prováděnou v elektrizační soustavě, v důsledku poruchy některého zařízení, při změně zatížení elektrizační soustavy nebo následkem mimořádných atmosférických dějů [9].

Poruchy lze rozdělit z hlediska změny základních veličin:

- Poruchy, při kterých dochází ke zvýšení proudu, obvykle za současného snížení napětí. Jedná se o zkrat a přetížení.
- Poruchy, při kterých dochází ke zvýšení napětí. Jedná se o atmosférická přetížení, přetížení způsobená spínání velkých indukčností, kapacit a ferorezonanční jevy.

Dále se poruchové stavy dělí:

- Souměrné, projevují se ve všech fázích stejně.
- Nesouměrné, projevují se v jednotlivých fázích rozdílně [7].

3.1 Zkrat

Zkrat je definován jako náhodné, úmyslné spojení dvou nebo více obvodů, respektive vodivé spojení dvou nebo tří fází. V soustavách s uzemněným uzlem zdroje také spojení jedné nebo dvou fází se zemí. Během zkratu protékají obvodem zkratové proudy do místa vzniku zkratu, které jsou několikanásobně větší než provozní proudy a mají indukční charakter [9].

3.1.1 Příčiny vzniku zkratu

- Atmosférické nebo i provozní přepětí může způsobit porušení izolace vodiče a následně zkrat.
- Vady na izolaci a to jak z výrobních důvodů, tak i špatné technologii montáže.
- Nejčastější příčinou vzniku zkratů jsou přírodní vlivy, nesprávný zásah a manipulace lidského faktoru na vedení.
- Nedostatečná zkratová odolnost se vyskytuje u starších nerekonstruovaných zařízení v soustavách s prudkým nárůstem hodnot zkratových proudů [1].

3.1.2 Nebezpečné děje při zkratu

Při zkratu vznikají velké mechanické síly vlivem elektromagnetického působení zkratového proudu, které způsobují dynamické namáhání všech částí elektrických vedení.

Působení zkratových proudů je sice krátkodobé, ale vzhledem k velikostem proudů dochází k nebezpečnému tepelnému namáhání vodičů a elektrických zařízení. Jedná se především o nadměrné stárnutí izolace kabelu, narušení mechanické pevnosti spojů, zmenšování pevnosti vodičů a také nebezpečí vzniku požáru.

Při vzniku zkratu dochází k náhlému poklesu impedance obvodu mezi místem zkratu a napěťovými zdroji. Tento jev způsobí vzrůst proudů ve větvích oproti normálnímu chodu a pokles napětí v uzlech elektricky blízkých místu zkratu. Hluboké poklesy napětí se nepříznivě projeví na chodu mnoha elektrických spotřebičů. Dále mohou způsobit narušení stability paralelního chodu transformátorů, což je nejnebezpečnější následek zkratů.

Následkem vypínání zkratových proudů vznikají přepětí dosahující hodnoty až dvojnásobku jmenovitého napětí.

Zkratové proudy neblaze působí i na sdělovací zařízení svým magnetickým polem a tím i indukovaným napětím [1,9].

3.1.3 Rozdělení zkratů

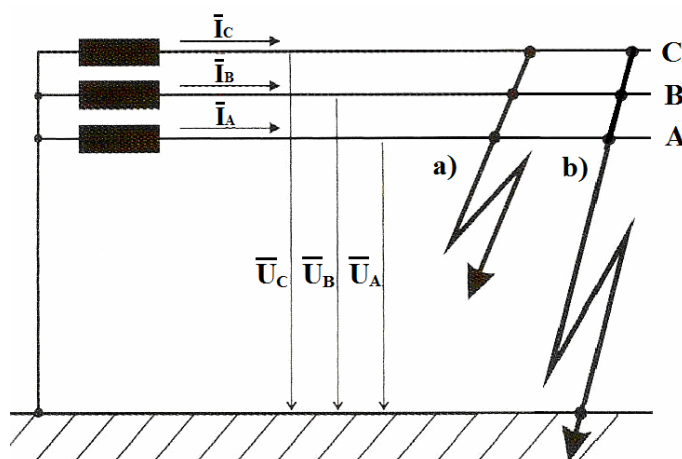
Trojfázový zkrat – obr. 10 a).

Trojfázový zemní zkrat – obr. 10 b).

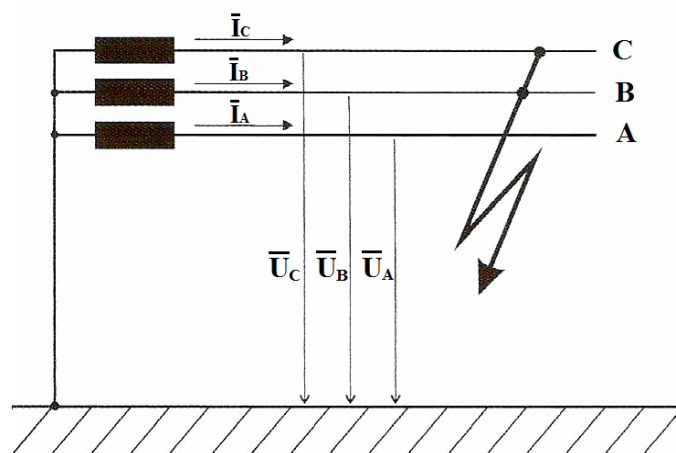
Dvoufázový zkrat – obr. 11.

Dvoufázový zemní zkrat – obr. 12.

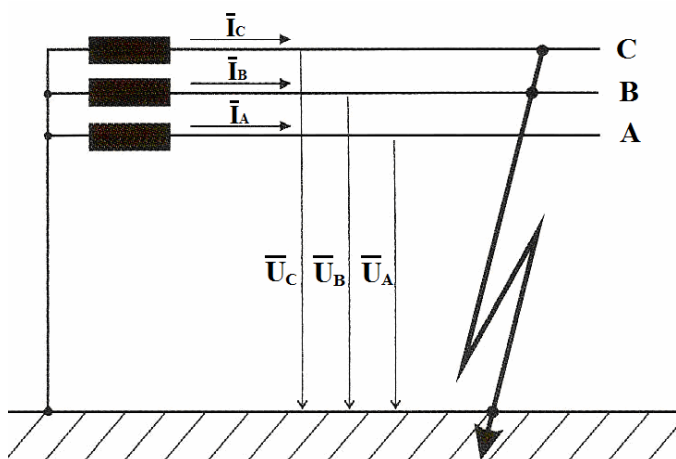
Jednofázový zkrat – obr. 13.



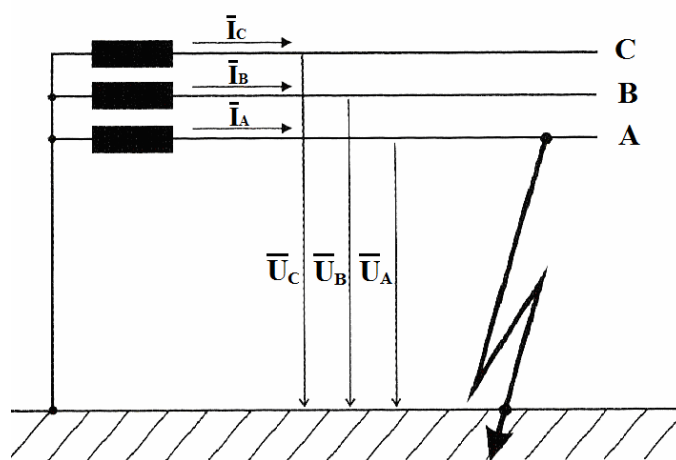
Obr. 10: Trojfázový zkrat a), trojfázový zemní zkrat b) [1]



Obr. 11: Dvoufázový zkrat [1]



Obr. 12: Dvoufázový zemní zkrat [1]



Obr. 13: Jednofázový zkrat [1]

3.2 Zemní spojení

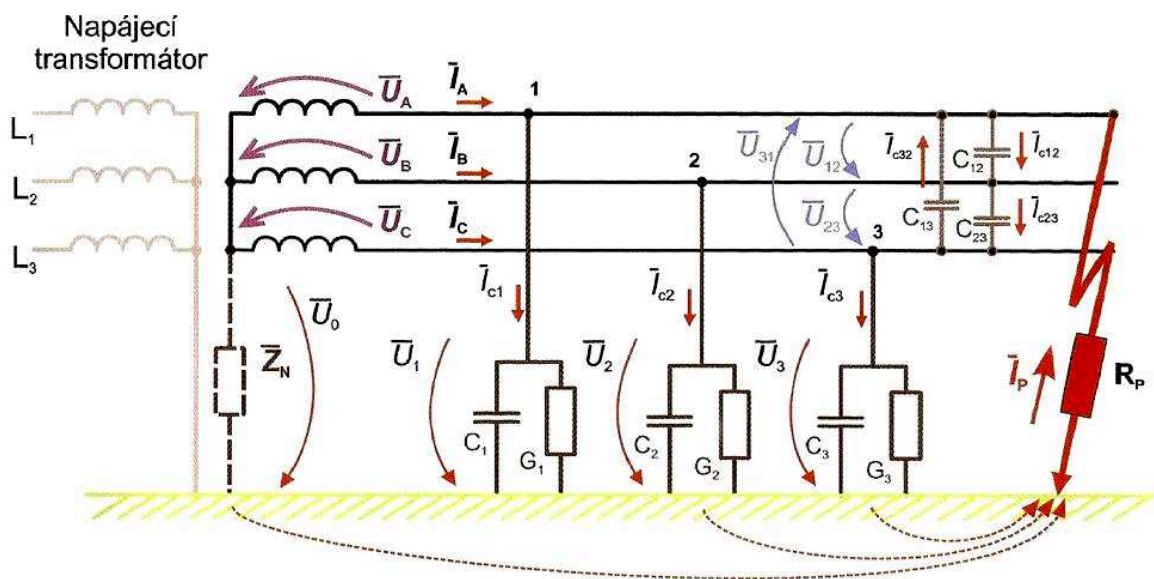
Spojení jedné fáze se zemí v sítích provozovaných s izolovaným uzlem a sítích kompenzovaných nazýváme zemní spojení. Při zemním spojení poruchový proud nedosahuje tak velkých hodnot a není tedy bezpodmínečně nutné okamžité odpojení postižené části vedení. Poruchový proud zemního spojení je nezávislý na vzdálenosti od zdroje a vyznačuje se kapacitním charakterem [9].

V případě spojení jedné fáze se zemí prochází poruchový kapacitní proud \bar{I}_P místem poruchy, dochází ke změně velikostí amplitud, posuvů kapacitních proudů v jednotlivých fázích a napětí uzlu proti zemi.

Při zemním spojení ve fázi A pro fázová napětí platí:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= 0, \\ \bar{U}_0 &= -\bar{U}_A, \\ \bar{U}_2 &= \bar{U}_B + \bar{U}_0 = -\sqrt{3}e^{j30^\circ} \bar{U}_A, \\ \bar{U}_3 &= \bar{U}_C + \bar{U}_0 = -\sqrt{3}e^{-j30^\circ} \bar{U}_A.\end{aligned}\tag{53}$$

V případě, kdy chceme určit celkový poruchový proud a napětíové poměry vycházíme z náhradního složkového schématu (obr. 15).



Obr. 14: Schematické znázornění soustavy v okamžiku 1pólové poruchy [1]

Z_N obecná impedance uzlu transformátoru,

$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ fázory napětí představující zdroj elektromotorického napětí,

\bar{U}_0 napětí uzlu soustavy vůči zemnicí soustavě,

$\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$ fázory proudu tekoucí ze zdroje elektromotorického napětí,

$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$ fázory napětí proti zemi v místě nesymetrie,

$\bar{I}_{c1}, \bar{I}_{c2}, \bar{I}_{c3}$ fázory kapacitního proudu,

$\bar{U}_{12}, \bar{U}_{23}, \bar{U}_{31}$ napětí na mezifázových kapacitách,

$\bar{I}_{c12}, \bar{I}_{c32}, \bar{I}_{c23}$ proudy na mezifázových kapacitách,

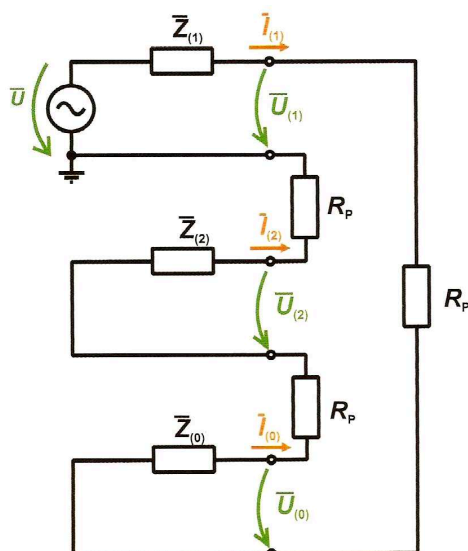
C_{12}, C_{32}, C_{23} mezifázové kapacity soustavy,

C_1, C_2, C_3 kapacity soustavy,

G_1, G_2, G_3 vodivosti soustavy,

\bar{I}_P poruchový proud,

R_P odpor zemního spojení.



Obr. 15: Složkové schéma 1pólové poruchy [1]

\bar{U} symetrický zdroj napětí,

$\bar{Z}_{(1)}$ sousledná složka impedance,

$\bar{Z}_{(2)}$ zpětná složka impedance,

$\bar{Z}_{(0)}$ netočivá složka impedance,

$\bar{I}_{(1)}, \bar{I}_{(2)}, \bar{I}_{(0)}$ složkové proudy,

$\bar{U}_{(1)}, \bar{U}_{(2)}, \bar{U}_{(0)}$ složková napětí,

R_P odpor zemního spojení.

Pro proudy složkových schémat platí:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \bar{I}_A \quad [\text{A}], \quad (54)$$

za předpokladu $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$ lze pro proud složkového schématu napsat:

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{\bar{U}}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p} \quad [\text{A}]. \quad (55)$$

Poruchový proud při respektování (obr. 14) s opačným směrem toku je roven:

$$\bar{I}_p = -\bar{I}_A = -3\bar{I}_{(1)} = \frac{-3\bar{U}}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p} \quad [\text{A}] [1]. \quad (56)$$

3.2.1 Síť s izolovaným uzlem

U izolovaných sítí není nulový bod transformátoru spojen se zemnicí soustavou, je izolován. Kapacity jednotlivých fází vedení nepoškozené sítě proti zemi i svodové odpory jsou přibližně symetrické a při napájení symetrickým zdrojem jsou fázová napětí proti zemi stejně velká. Uzel proti zemi má téměř nulové napětí. Taktéž proudy síťových kapacit proti zemi dosahují stejných hodnot [2].

Tyto sítě jsou nejčastěji provozovány u malých distribučních a průmyslových rozvodů, jejichž celková hodnota kapacitního proudu nepřesáhne 20 A. Při poruše se symetrie zruší a celkový kapacitní proud soustavy je dán součtem kapacitních proudů nepostižených fází celé sítě, které se uzavírají přes místo zemního spojení. V případě, že dojde k překročení hodnoty 20 A kapacitního proudu, je nutné provést kompenzaci.

Soustavu s izolovaným uzlem můžeme považovat na (obr. 14) za předpokladu impedance $Z_N \rightarrow \infty$. Velikost proudu a napěťové poměry nejsou závislé na místě sítě, kde k poruše dojde. Velikost kapacitního proudu zemního spojení pro nulový odpor poruchy, tedy pro případ kovového zemního spojení a při zanedbání sousledné a zpětné impedance je dána vztahem:

$$I_{P(kap)} = j3\omega C \bar{U} \quad [\text{A}], \quad (57)$$

kde \bar{U} fázor fázového napětí [V]

nebo pro vyjádření jmenovitého napětí soustavy

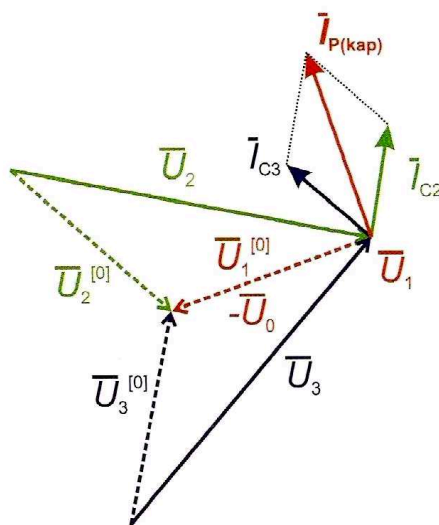
$$I_{P(kap)} = j\sqrt{3}U_n \omega C \quad [\text{A}], \quad (58)$$

kde C kapacita soustavy [F],

ω úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] [1].

Jelikož poruchový proud zemního spojení má kapacitní charakter, dochází k nestabilnímu hoření oblouku a vzniká přerušované zemní spojení. V těchto případech může být

přerušované zemní spojení zdrojem přepětí, proto je užívání izolovaného uzlu omezeno na malé sítě [9].



Obr. 16: Fázorový diagram napětí a proudů v případě vzniku kovového zemního spojení v izolované soustavě [1]

Fázorový diagram na (obr. 16) je sestaven na základě simulace jednopólového zemního spojení v izolované soustavě 6 kV pro případ kovového zemního spojení, tedy pro $R_p = 0$.

Při ideálním zemním spojení ($R_p = 0$.) platí:

- napětí postižené fáze je rovno nule,
- napětí nepoškozených fází vzrostou na hodnotu sdruženého napětí,
- napětí uzlu se vzroste na fázové napětí sítě.

Četnost výskytu kovového zemního spojení je méně pravděpodobné, jelikož jeho reálným místem vzniku jsou místa s dobrým uzemněním, např. distribuční trafostanice vn/nn. V případě, že dojde k přeskočení oblouku na neživou část trafostanice vodivě spojenou s uzemněním. Kovové zemní spojení se vyznačuje malou hodnotou přechodového odporu, řádově jednotky ohmů.

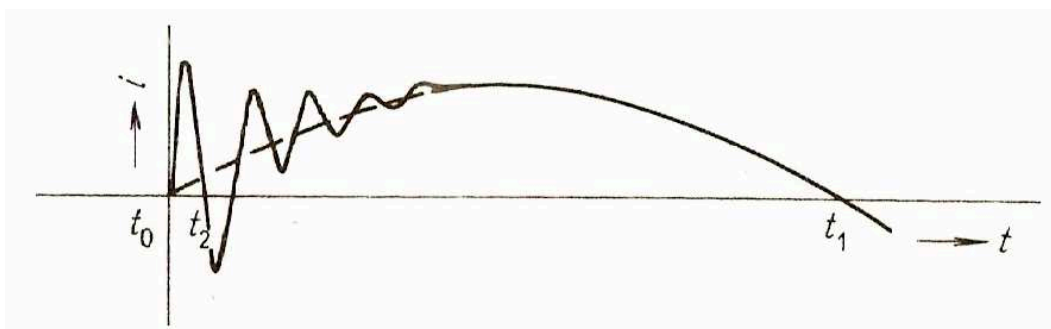
Nejčastějším typem jednopólových poruch jsou odporová zemní spojení, kdy přechodový odpor poruchy může dosáhnout několik stovek až tisíce ohmů. Nevýhodou odporových zemních spojení je obtížná identifikace a následná lokalizace, jelikož dochází k omezení úrovně poruchového proudu. Obecně se udává, že poruchy s odporem několika tisíců ohmů jsou pouze obtížně zaznamenatelné.

Odporová zemní spojení s častou změnou odporu, se nazývají oblouková zemní spojení charakterizovaná krátkodobým přerušováním hořením oblouku způsobující krátkodobá přepětí a proudové špičky značných úrovní [1].

3.2.1.1 Přerušované zemní spojení

Jak už bylo řečeno, přerušovaná zemní spojení mohou být zdrojem nebezpečných přepětí. Jejich děj je charakterizován nestálým hořením oblouku, jehož zhasnutí při průchodu proudu nulou zemní spojení přeruší. Následkem růstu napětí na postižené fázi se může oblouk opět obnovit. Zhasnutí a obnovení oblouku se může několikrát opakovat, což může způsobit vznik přepětíových oscilací v celé elektrické síti. Napětíových oscilací se účastní celá síť, hlavní parametry určující frekvenci oscilací jsou indukčnosti a kapacity celé sítě i napájecích transformátorů.

Po ukončení přechodového děje zůstává síť v ustáleném chodu se zemním spojením, dokud nedojde ke zhasnutí oblouku. Ideální podmínky pro zhasnutí oblouku ve střídavých obvodech vznikají při průchodu proudu nulou, z (obr. 17) je zřejmé, že ke zhasnutí oblouku může dojít buď v okamžiku t_2 nebo t_1 [9].



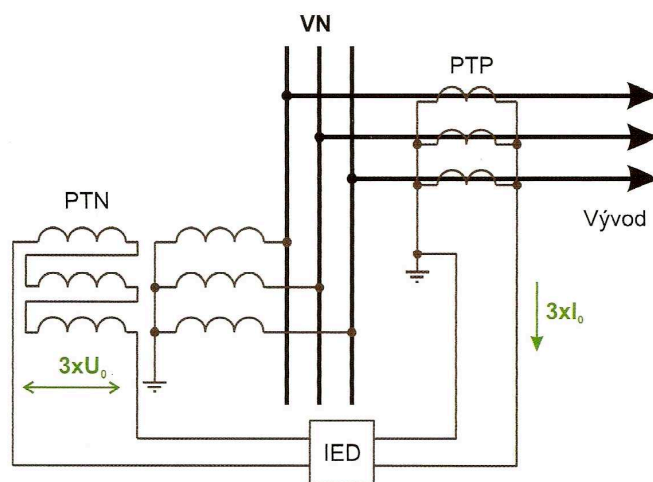
Obr. 17: průběh proudu při vzniku zemního spojení [9]

3.2.1.2 Netočivé složky proudu a napětí zemního spojení v izolované soustavě

Detekce zemních poruch je založena principu měření netočivých složek napětí a proudů na každém vývodu v napájecích rozvodnách. Netočivá složka napětí je měřena za pomoci tří součtových přístrojových napětíových transformátorů. Netočivá složka proudu je měřena podobně zapojením tří měřících transformátorů proudů. Ve skutečnosti je měřen trojnásobek netočivé složky napětí a proudů (obr. 18). Velikost a fázové posunutí netočivých složek napětí a proudů jsou rozhodující pro detekci poruchového vývodu a pro každý druh provozu jsou odlišné.

V příloze A je schéma izolované soustavy s dvěma vývody z napájecí rozvodny, vývod s indexem N bez poruchy a vývod s indexem P je postižen jednopólovou poruchou ve fázi A. V bezporuchovém stavu je fázorový součet proudů přes příčné admitance roven nule za předpokladu symetrie fázových napětí soustavy. Zemní spojení se projeví napětíovou nesymetrií, fázorový součet proudů již není roven nule, je roven poruchovému proudu. Místem poruchy prochází poruchový proud $\bar{I}_f = \bar{I}_{f-G} + j\bar{I}_{f-C}$. Jalová složka je tvořena celkovým kapacitním proudem soustavy a činná složka celkovým svodovým proudem.

Pokud bude měřena netočivá složka napětí a netočivá složka proudu nepostiženého vývodu nebo vývodu za místem poruchy, ze strany od napáječe, bude fázový posun netočivé složky napětí a proudu menší než 90° , je dán poměrem svodového a kapacitního proudu monitorované části. U vývodu s poruchou bude fázový posun blíží se 270° a závisí na poměru svodového a kapacitního proudu části vedení bez poruchy [1].



Obr. 18: Měření netočivé složky napětí a proudu [1]

4. KOMPENACE ZEMNÍCH KAPACITNÍCH PROUDŮ

Převážná většina kompenzovaných distribučních soustav v ČR je provozována s variantou přepínání odporníku na sekundární straně zhášecí tlumivky. V průmyslových závodech a elektrárenských rozvodech vlastní spotřeby jsou sítě nepřímo uzemněné přes indukčnost nebo uzemněny pomocí odporníku [1].

4.1 Kompenzovaná síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

Kompenzované sítě jsou charakteristické tím, že jejich uzel transformátoru je spojen se zemí přes zhášecí tlumivky nebo u nichž je vytvořen umělý nulový bod pomocí zhášecích transformátorů. Zhášecí tlumivka kompenzuje kapacitní proud zemního spojení tak, že místem poruchy prochází pouze zbytkový proud činného charakteru velikosti 3 % - 10 % celkového kapacitního proudu. V našich distribučních sítích se hlavně využívá centralizovaná kompenzace, s využitím jedné zhášecí tlumivky zapojené mezi uzel transformátoru a zemnicí soustavou. Velikost tlumivky je řízena automatikou a to tak, aby byla tlumivka v paralelní rezonanci s celkovou kapacitou sítě.

Pro proud v místě poruchy za předpokladu $R_p = 0$ platí:

$$\bar{I}_P = I_R + j(I_C - I_L) \quad [\text{A}], \quad (59)$$

kde I_R činná složka proudu [A],

I_L induktivní proud zhášecí tlumivky [A],

I_C kapacitní proud sítě [A].

Výsledný poruchový proud je složen z imaginární složky představující rozdíl kapacitního proudu sítě a induktivního proudu zhášecí tlumivky. Reálná část je tvořena nekompenzovanou činnou složkou, (tj. ztráty ve zhášecí tlumivce a svodové odpory fázových vodičů).

Kompenzační proud během poruchy je dán vztahem:

$$\bar{I}_L = -\frac{jU_n}{\sqrt{3}X_{TL}} \quad [\text{A}], \quad (60)$$

kde U_n jmenovité napětí soustavy [V],

X_{TL} induktivní reaktance tlumivky [Ω].

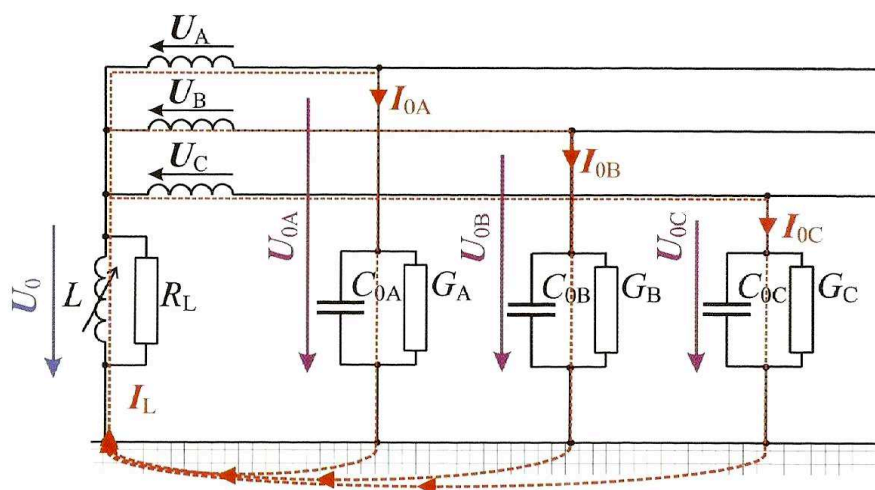
Výsledná indukčnost tlumivky ve stavu rezonance je dána vzorcem:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_{SOU}} \quad [\text{H}], \quad (61)$$

kde C_{SOU} celková kapacita všech vedení proti zemi [F],

ω úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

Pro hodnotu kapacitního proudu $|\bar{I}_C| = |\bar{I}_L|$ má poruchový proud nejmenší velikost danou ztrátami ve zhášecí tlumivce a svodovými odpory sítě. Nebezpečí úrazu dotykovým, krokovým napětím je minimální, samozhášecí schopnost sítě je maximální. Výhodou kompenzovaných sítí je možnost provozu se zemním spojením po dobu nezbytně nutnou pro odstranění jeho příčiny. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na zhášecí tlumivku a automatiku ladění [1].



Obr. 19: Schéma kompenzované sítě přes zhášecí tlumivku [1]

4.1.1 Netočivé složky proudu a napětí během zemního spojení v kompenzovaných soustavách

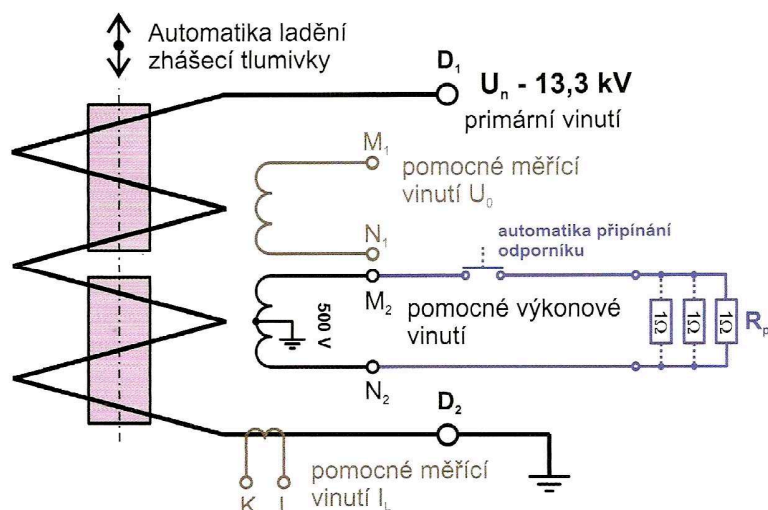
Schéma kompenzované soustavy s dvěma vývody z napájecí rozvodny, vývod s indexem N bez poruchy a vývod s indexem P je postižen jednopólovou poruchou ve fázi A, příloha B. V bezporuchovém stavu je fázorový součet proudů přes příčné admitance roven nule za předpokladu symetrie fázových napětí soustavy. Zemní spojení se projeví napětovou nesymetrií, fázorový součet proudů již není roven nule, je roven poruchovému proudu. Celkový kapacitní proud, který prochází kapacitami jednotlivých fází sítě a místem poruchy, je kompenzován kompenzačním proudem \bar{I}_L . Při ideální kompenzaci platí $\bar{I}_L = \bar{I}_{f-c}$. Za tohoto předpokladu je poruchový proud dán pouze činnou složkou, tedy celkovým svodovým proudem soustavy.

Pokud bude měřena netočivá složka napětí a netočivá složka proudu nepostiženého vývodu nebo vývodu za místem poruchy, ze strany od napáječe, bude fázový posun netočivé složky napětí a proudu menší než 90° , je dán poměrem svodového a kapacitního proudu monitorované části. U vývodu s poruchou bude fázový posun větší jako 90° a závisí na poměru kapacitního proudu části vedení bez poruchy a proudu procházejícího svody linek a vodivostí tlumivky G_{TL} [1].

4.1.2 Zhášecí tlumivka a rezonanční křivka

Pro správné nastavení proudu zhášecí tlumivky a indikaci vývodu se zemním spojením je nutné pro každou tlumivku připojenou k transformátoru 110 kV/vn s kapacitním proudem venkovní nebo smíšené sítě větším než 50 A zajistit také samočinnou regulaci vyladění tlumivky s možností manuální regulace proudu tlumivkou, zobrazení ukazatele proudového nastavení tlumivky i napětí na tlumivce pro sledování vyladěného stavu a automatiku přepínání odporu pro navýšení činné složky poruchového proudu (převážně stavebnicový odporník na výkonovém vinutí tlumivky) [1].

Schematické znázornění tlumivky (obr. 20), tato tlumivka se skládá z primárního vinutí, výkonového vinutí a dvou pomocných měřicích vinutí. Primární vinutí je řízeno automatikou ladění do určitého požadovaného stavu kompenzace, jeho jmenovitá hodnota napětí je 13,3 kV. Pomocné vinutí M_1N_1 slouží k měření napětí nulového bodu U_0 transformátoru a zemnicí soustavy. Pomocné vinutí KL je používáno k připojení přístrojového transformátoru proudu, který slouží k měření kompenzačního proudu. Výkonové pomocné vinutí M_2N_2 má jmenovitou hodnotu napětí 500 V a je zapojeno k pomocným stavebnicovým odporníkům. Přepínání odporníků může být manuální nebo pomocí stykačů.



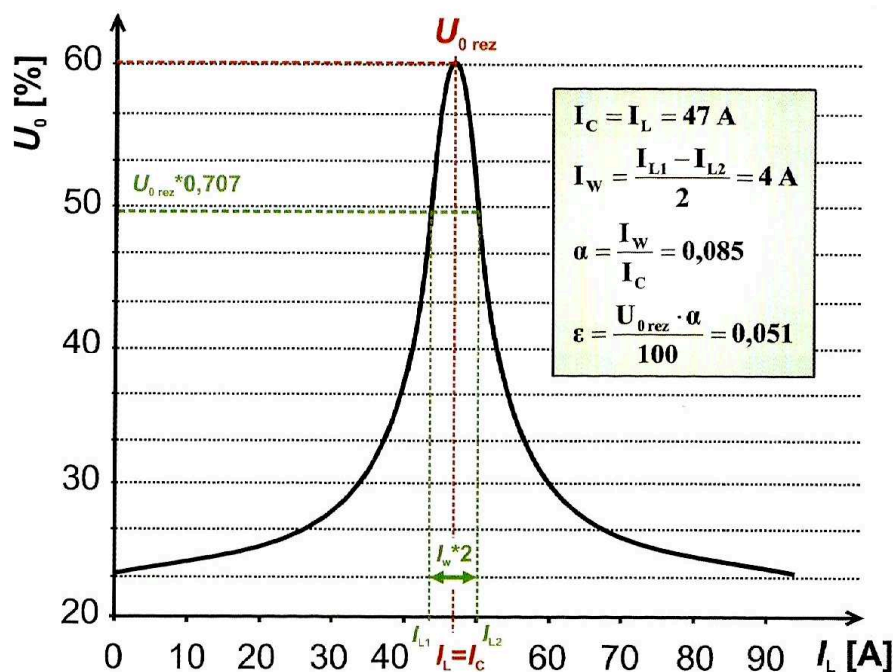
Obr. 20: Zjednodušené schéma zhášecí tlumivky s automatikou přepínání pomocného odporníku k výkonovému vinutí [1]

Pro správnou kompenzaci kapacitního proudu je nezbytné znát rezonanční křivku soustavy, která vyjadřuje závislost napětí uzlu U_0 na kompenzačním proudu tlumivky I_L . Rezonanční křivka zhášecí tlumivky soustavy se zjišťuje postupným laděním zhášecí tlumivky připojené k soustavě bez zemního spojení za průběžného odečítání U_0 a I_L .

Zjišťování rezonanční křivky je možné u soustav s vysokým podílem venkovního vedení tedy soustav nesymetrických. Kabelové sítě projevují dobrou symetrií fázových napětí, (plochá rezonanční křivka), proto je nezbytné pro zjištění charakteristických hodnot zhášecí

tlumivky vytvořit umělou nesymetrii soustavy. Z rezonanční křivky (obr. 21) se odečte hodnota kapacitního proudu I_C , který je roven kompenzačnímu proudu I_L v místě rezonančního napětí U_{0rez} . Dále je nutné zjistit velikost svodového proudu I_W , činitel nesymetrie ε a činitel útlumu sítě α .

Zhášecí tlumivka se nastavuje na hodnotu rezonančního napětí U_{0rez} tak, aby kompenzovala kapacitní proud sítě. Nevýhodou všech zhášecích tlumivek je kompenzování kapacitního proudu pouze o základní frekvenci harmonické, ostatní frekvence nejsou kompenzovány [1].



Obr. 21: Rezonanční křivka soustavy [1]

4.2 Sítě uzemněné přes odporník

Výhody kompenzace zemních kapacitních proudů u kabelových vedení nejsou tak jednoznačné, jak je tomu u venkovních vedení. Většina poruch je trvalá a zmenšení poruchového proudu se může projevit ve samozhášení. Zhášecí tlumivka omezuje přepětí při vzniku zemních poruch, ale následný provoz stále namáhá izolaci zdravých fází a vzniká riziko vícenásobných poruch. Velikost odporníku připojeného do uzlu transformátoru, je volena tak, aby omezovala zemní kapacitní proudy na hodnoty přijatelné s ohledem na účinky poruchových proudů a zároveň bylo zajištěno tlumení přepětí, možnost použití jednoduchých ochran [2].

Pro určení napětí a proudů jednotlivých složkových soustav využijeme obecného schématu (obr. 15). U sítí uzemněných přes odporník nelze zanedbat odpory obloukových poruch a kapacity vedení. Pro proud poruchy platí:

$$\bar{I}_p = \frac{3\bar{U}}{2\bar{Z}_{(1)} + \frac{1}{\frac{1}{3R_N} + j\omega C} + \bar{Z}_{(0)V} + 3R_p} \quad [\text{A}], \quad (62)$$

kde C kapacita soustavy [F],

R_N rezistance uzlového odporníku [Ω],

$\bar{Z}_{(1)}$ sousledná složka impedance [Ω],

ω úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

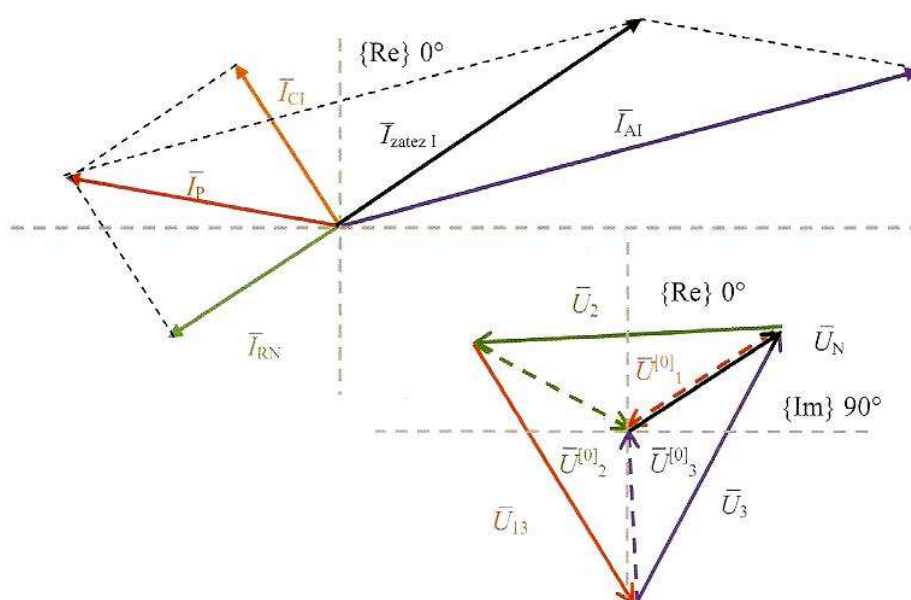
R_p odpor zemního spojení [Ω],

\bar{U} fázor napětí [V],

$\bar{Z}_{(0)V}$ netočivé složky impedance transformátoru a vedení [Ω].

Ve většině případů stačí vycházet ze zjednodušených vztahů. Proud postižené fáze \bar{I}_{AI} je dán vektorovým součtem poruchového proudu \bar{I}_p a proudu zátěže \bar{I}_{zatezI} . Poruchový proud je dán vektorovým součtem vlastního kapacitního proudu \bar{I}_{CI} a proudu tekoucím uzlovým odporníkem \bar{I}_{RN} .

$$\bar{I}_{AI} = -\bar{I}_p + \bar{I}_{zatezI} = -(\bar{I}_{RN} + \bar{I}_{CI}) + \bar{I}_{zatezI} \quad [\text{A}] [1]. \quad (63)$$

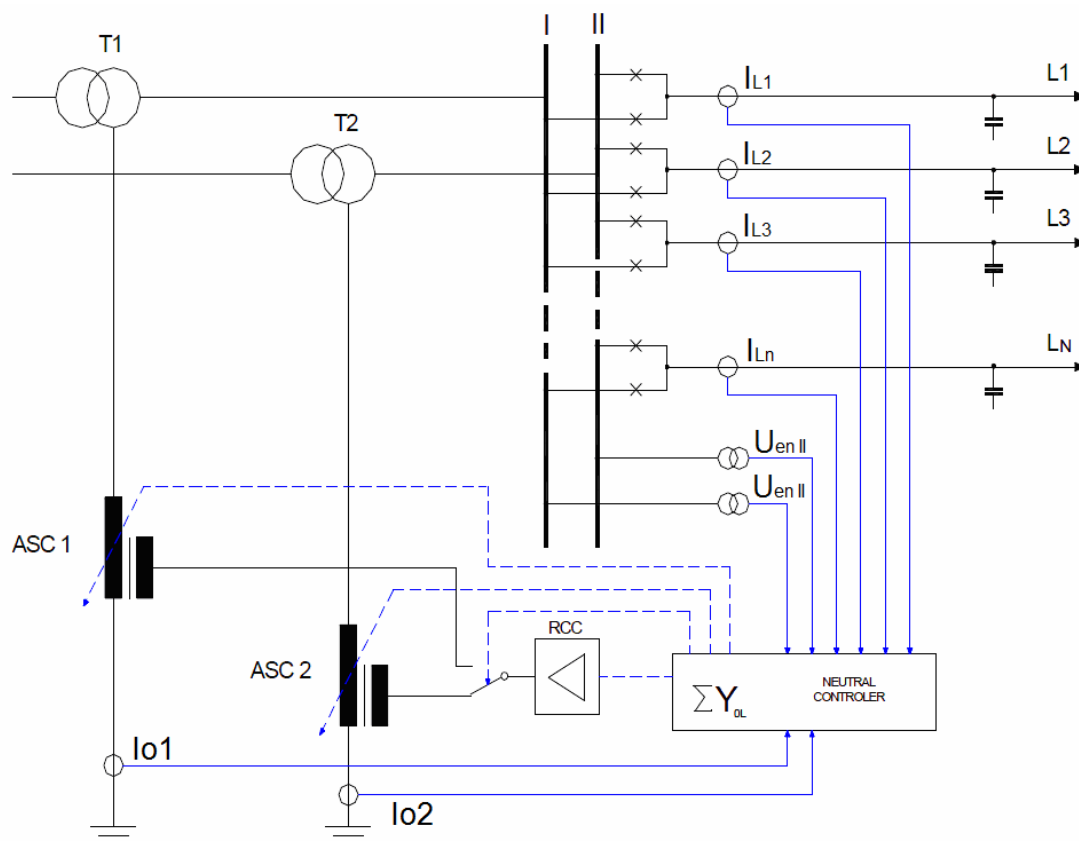


Obr. 22: Fázorový diagram napětí a proudů při 1pólovém zkratu, $R_p = 0$ [1]

4.3 Systém RCC

Jedná se o automatiku, která v sobě zahrnuje jak prostředek pro detekci postiženého vývodu, tak pro kompenzaci poruchového proudu, vyvinutá firmou Swedish Neutral. Na (obr. 23) je schéma systému RCC ladící dvě paralelně pracující zhášecí tlumivky připojené na dvojitý systém přípojníc. Centrální řídicí jednotka (neutral controller) zpracovává měření netočivých složek proudů všech vývodů a také netočivé složky napětí obou systémů přípojníc (I a II). Funkce automatiky je založena na principu admitanční metody, která během bezporuchového stavu počítá celkovou admitanci vývodů a porovnává ji s admitancí po vzniku poruchy. Poruchový vývod je označen ten, na kterém došlo ke změně admitance a ostatní vývody beze změny jsou klasifikovány jako nepostižené, po jehož označení provede automatika neutralizaci pomocí ladění dvou paralelně pracujících zhášecích tlumivek.

Lokalizace poruchy pomocí RCC vyžaduje zapojení postiženého vývodu do kruhu s vývodem nepostiženým poruchou, kde se využívá přerozdělení netočivé složky proudu vlivem zkruhování vývodů a z poměru admitancí obou vývodů se zjistí místo poruchy [1].



Obr. 23: Systém RCC [12]

5. LOKALIZACE MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ

Metody používané pro lokalizaci místa zemního spojení lze rozdělit do dvou základních skupin na aktivní a pasivní. Aktivní metody využívají pro lokalizaci zemního spojení pomocného signálu se specifickou frekvencí připojeného do soustavy. V případě poruchy následným „sledováním“ tohoto signálu dojde k lokalizaci místa poruchy. Jelikož aktivní metody nejsou kvůli technické náročnosti rozšířeny, zaměříme se především na pasivní metody využívající proudových a napěťových signálů generovaných sledovanou poruchou.

Pasivní metody monitorují proudové a napěťové poměry poruchou postižené soustavy, nepotřebují ke své funkci žádné injektované signály. Parametry proudů a napětí jsou vyhodnocovány během přechodného děje zemního spojení nebo po jeho ukončení. Pasivní metody se dále dělí na statické využívající pro určení místa poruchy ustáleného signálu po odeznění přechodného děje a dynamické, jež vyhodnocují signál během přechodového děje [1].

5.1 Statické metody pro izolované soustavy

Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu

Po vzniku zemního spojení se pro jednotlivé vývody vyhodnotí změna netočivé složky proudu spolu s fázovým posunem netočivé složky napětí oproti referenčním hodnotám v bezporuchovém stavu. Poruchový vývod je ten, u něhož je největší změna jalové netočivé složky proudu.

Určení toku netočivé složky jalového výkonu

Základním principem metody je vyhodnocení toku jalového výkonu, jeho znaménka. U poruchového vývodu předbíhá netočivá složka napětí netočivou složku proudu o 90° . Je-li znaménko jalového výkonu na vývodu záporné, tak je vývod poruchový. Nevýhodou metody je špatná lokalizace poruch s malým netočivým proudem.

Porovnání amplitudy netočivé složky proudu

Metoda porovnává amplitudy netočivých složek proudů v jednotlivých vývodech. Když je vlivem poruchy překročena nastavená hodnota netočivého napětí, začnou se porovnávat amplitudy netočivých proudů. Poruchové vedení je posléze označeno to, u kterého je amplituda maximální. Nevýhodou je nutnost velmi přesného měření netočivých proudů a nízká citlivost.

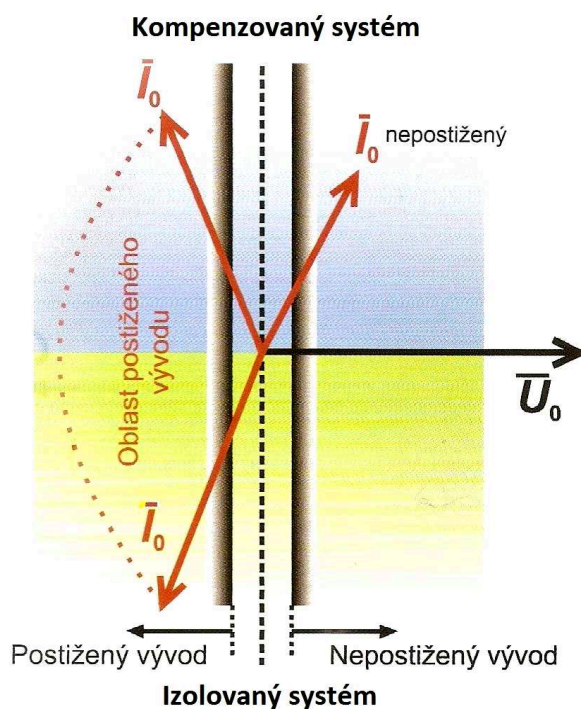
Porovnávání fáze netočivé složky proudu

Principem metody je porovnávání fází netočivých složek proudů. Poruchový vývod se vyznačuje oproti „zdravým“ vývodům opačnou fází netočivé složky proudu. U velmi krátkých vedení je citlivost metody nízká a může dojít k chybné lokalizaci. Ke zvýšení přesnosti lokalizace lze použít kombinaci výše zmíněné metody [1].

5.2 Statické metody pro kompenzované soustavy

Wattmetrická metoda

I při správně navržené kompenzaci kapacitních proudů nelze poruchový proud úplně vykompenzovat, vždy přetrvává zbytkový proud činného charakteru, proto lze v kompenzovaných sítích využít k lokalizaci poruchy právě reziduální proud. Činná složka netočivého proudu, popřípadě činný výkon netočivé složky, je vždy nejvyšší u poruchového vývodu a má opačný směr než nepostižené „zdravé“ vývody. Na správnou funkci této metody mají zásadní vliv navržené měřicí transformátory a taktéž velikost činné složky netočivého proudu. Rozdílné chyby fáze a úhlu použitých PTP vzhledem v malé úrovni reziduálního proudu mohou způsobit neselektivní zapůsobení metody. Pro zvýšení citlivosti ochran a tím i úrovně činné složky se využívá přepnutí pomocného odporníku nejen v ČR.



Obr. 24: Charakteristika wattmetrického článku [1]

Admitanční metoda netočivé složky

Princip metody je založen na nepřetržitém monitorování netočivé složky proudu \bar{I}_0 a napětí \bar{U}_0 , v případě překročení nastavené hodnoty netočivé složky proudu a napětí se provede výpočet admitance dle následujícího vztahu:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} \quad [\text{S}]. \quad (64)$$

Pro správnou činnost metody se nejčastěji používá vyhodnocení admitance po přírůstcích. Admitance je dána poměrem přírůstku netočivé složky proudu a napětí mezi stavem před a po poruše

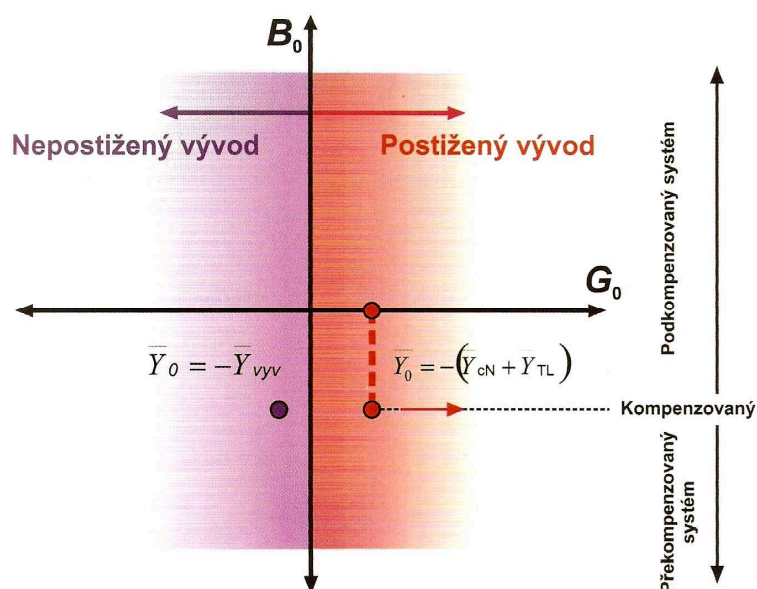
$$\bar{Y}_0 = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0} \quad [\text{S}]. \quad (65)$$

U vývodu bez poruchy je celková admitance rovna admitanci chráněného vývodu se záporným znaménkem

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{vyv} = -(G_{vyv} + jB_{vyv}) \quad [\text{S}]. \quad (66)$$

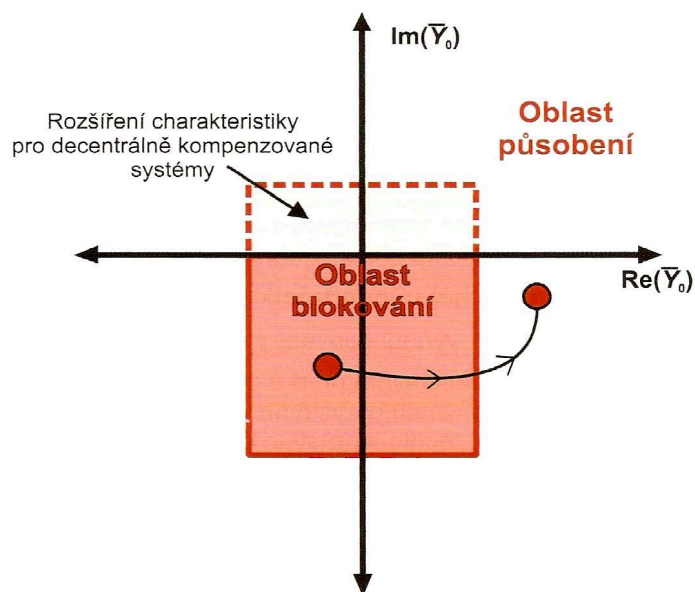
Kvůli malým úrovním složek \bar{I}_0 a \bar{U}_0 , a tím i nepřesnosti výpočtu, může mít konduktance G_{vyv} a susceptance B_{vyv} kladné hodnoty u decentrální kompenzace a vlivem chyby měření. Pro konkrétní vyhodnocení soustavy je důležitá správná volba provozní charakteristiky. Níže uvedený vzorec určuje stav, kdy dojde k indikaci postiženého vývodu. Výsledná admitance je tedy rovna součtu admitance tlumivky \bar{Y}_{TL} a celkové admitance nepostižených vývodů \bar{Y}_{cN} .

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL}) \quad [\text{S}]. \quad (67)$$



Obr. 25: Příklad admitanční metody [1]

Pracovní charakteristiky admitanční metody jsou podobné distanční ochraně (obr. 26). Zásadní rozdíl je v tom, že dokud je vypočtená admitance uvnitř charakteristiky, jedná se o nepostižitelný vývod, jakmile se admitance dostane vně charakteristiky, vývod je označen jako poruchový.



Obr. 26: Pracovní charakteristika admitanční metody [1]

Konduktanční metoda

Metoda vychází z podobného principu jako výše uvedená metoda. Zde se vyhodnocuje pouze konduktance vypočtená z netočivé složky napětí a proudu.

Pro poruchový vývod platí:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad [\text{S}]. \quad (68)$$

Pro neporuchový vývod platí:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = (G_{vyv}) \quad [\text{S}], \quad (69)$$

kde G_{cN} netočivá složka konduktance neporuchových linek [S],

G_{TL} netočivá konduktance zhášecí tlumivky [S],

G_{vyv} netočivý konduktance chráněné linky [S] [1].

Metoda vyšších harmonických

Hlavním cílem použití zhášecí tlumivky je kompenzace základní harmonické poruchového proudu. Kvůli nelineárním spotřebičům obsahuje kapacitní proud i násobky harmonické zejména 3. 5. a 7. řádu, které nejsou kompenzovány. Právě těchto násobků harmonických využívá metoda a vyhodnocuje signály dané jejich sumací pro ještě vyšší citlivost. Vývod s maximální úrovní tohoto signálu je indikován jako postižený poruchou. Přesnost metody je dána zejména přesností frekvenční analýzy a měření [1].

5.3 Dynamické metody pro kompenzované soustavy

Citlivost statických metod, které vyhodnocují signály až po odeznění přechodového děje, není tak velká jako u dynamických metod, které jsou schopny detekovat i krátkodobá zemní spojení. Zásadní nevýhoda dynamických metod je většinou pouze jeden pokus pro konkrétní lokalizaci poruchy.

Metoda q_u – diagramu

Jedná se o grafickou metodu, která vyhodnocuje závislost netočivé složky proudu představující náboj q_0 na netočivé složce napětí. U poruchou nepostiženého vývodu lze vybíjecí proces popsat rovnicemi:

$$\begin{aligned} u_0(t) &= u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau, \\ u_0(t) &= u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}}, \end{aligned} \quad (70)$$

kde t_0 čas vzniku zemního spojení,

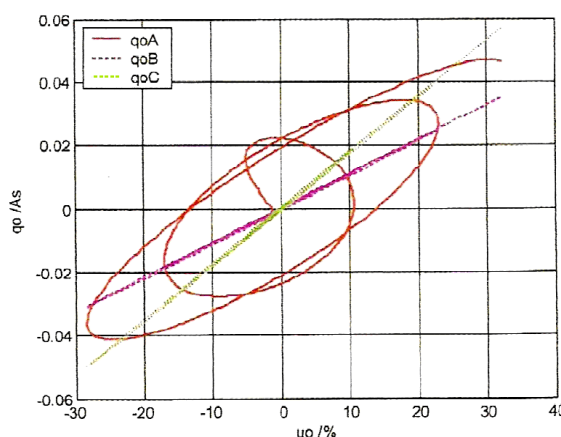
C_{eq} ekvivalentní kapacita mezi vodičem a zemí všech nepostižených vedení v celé síti,

i_0 okamžitá hodnota netočivé složky proudu monitorovaného vedení.

Jestliže v momentě vzniku zemního spojení je okamžitá hodnota netočivé složky napětí rovna nule, pak výsledek integrálu netočivé složky proudu na netočivé složce napětí, je ovlivněn pouze ekvivalentní kapacitou C_{eq} . Potom výsledná závislost netočivé složky napětí na netočivé složce náboje q_0 nepostiženého vedení je dána:

$$u_0(t) = \frac{q_0(t)}{C_{eq}}. \quad (71)$$

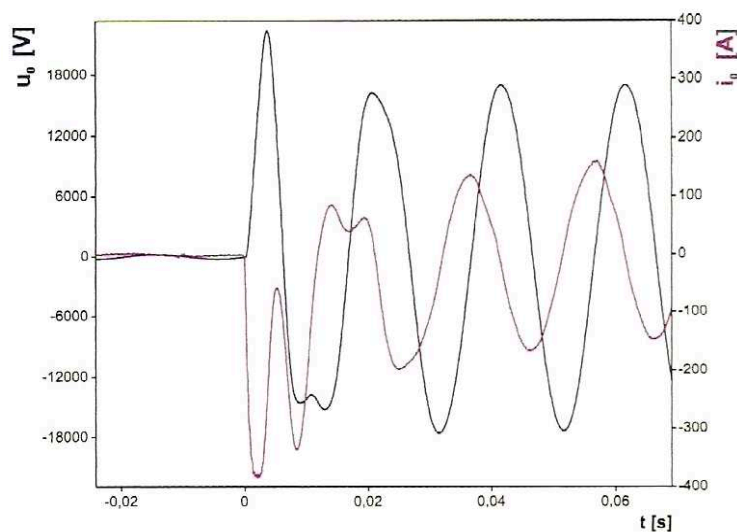
Výsledkem q_u – diagramu této rovnice je přímka, u postiženého vedení vlivem zhašecí tlumivky je závislost nelineární.



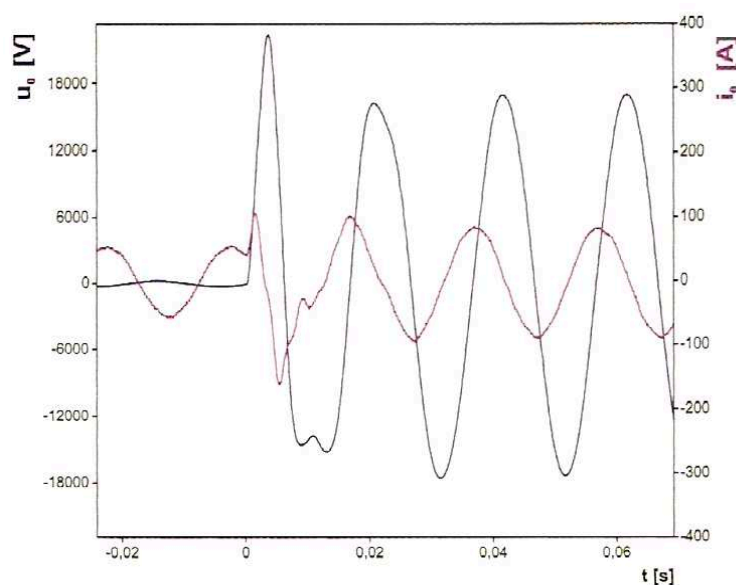
Obr. 27: Příklad q_u - diagramu, kde vývod q_0A je poruchový [1]

Metoda první půl – periody

Zemní spojení je doprovázeno krátkým přechodovým jevem, během kterého dojde k vybití kapacity postižené fáze a nabití nepostižených fází celé sítě a tím ke vzniku vybíjecího proudu o délce trvání řádově desítky milisekund. Princip metody spočívá v oscilografickém porovnávání netočivých složek napětí a proudů bezprostředně po vzniku poruchy. Jako postižený vývod poruchou za místem měření je označen ten, u kterého jsou naměřené složky netočivého napětí a proudu v první půl periodě v protifázi (obr. 28). Naopak u „zdravého“ vývodu je průběh napětí a proudu ve fázi (obr. 29) [1].



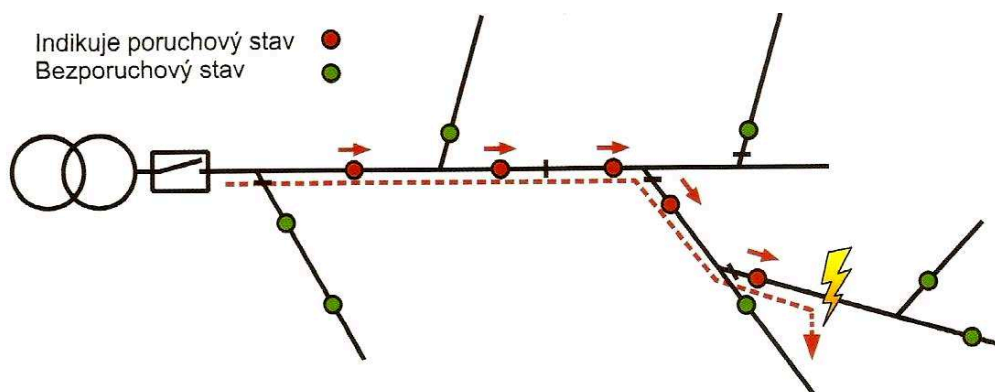
Obr. 28: Oscilografický průběh postiženého vývodu [1]



Obr. 29: Oscilografický průběh zdravého vývodu [1]

5.4 Lokalizace poruchy v sítích provozovaných přes odporník

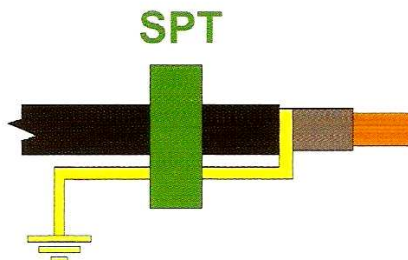
Pro určení místa poruchy v kabelových sítích využíváme indikátory poruch, které umožňují indikovat průchod zkratového proudu fázovým vodičem v soustavách vn. Jedná se o třífázové měřicí zařízení, které vyhodnocuje velikost proudu protékajících v jednotlivých fázích. Pokud měřený proud překročí nastavenou monitorovací hodnotu a čas zpoždění, dojde k signalizaci poruchového stavu. Místo poruchy je dohledáno stopováním jednotlivých indikátorů podél vedení (obr. 30).



Obr. 30: Lokalizace poruchy pomocí indikátorů zkratového proudu [1]

Indikátory jsou složeny z vlastní jednotky a tří měřících transformátorů proudu (STP), které jsou instalovány na jednotlivých fázích vedení a dodávají měřený signál vlastní jednotce. Dojde-li k překročení nastavené hodnoty vybavovacího proudu a vybavovací doby zareagují indikační prvky dané sítě. Napájení samostatných indikátorů je zajištěno nn soustavou nebo měřicími transformátory proudu, které odebírají potřebnou energii z měřeného obvodu.

Aby byla zajištěna správná funkce indikátoru, je nezbytně nutné, aby kabelová vedení opatřena stíněním, byla kompenzována proti proudu procházejícím stíněním a nedocházelo ke zkreslení měřeného proudu. Kompenzace je provedena zpětným provlečením stínění přes měřicí transformátor proudu, proto aby transformátor měřil pouze proud tekoucí jádrem kabelu (obr. 31) [1].



Obr. 31: Správná instalace měřícího transformátoru proudu [1]

5.5 Lokalizace postiženého vývodu

Spojování postiženého vývodu do kruhu

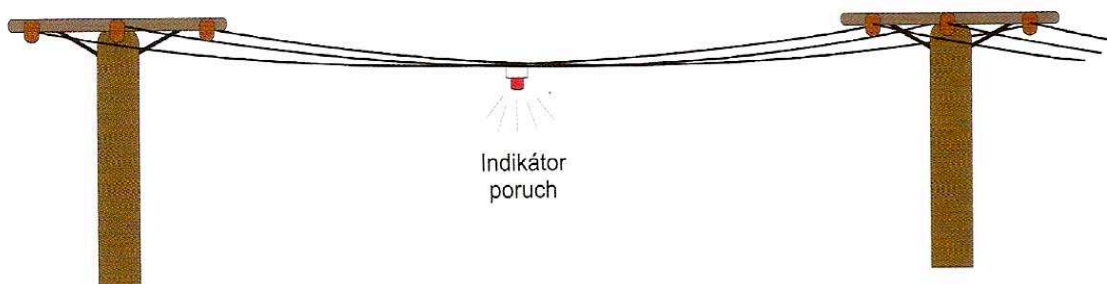
Spojení nepostiženého a postiženého vývodu do kruhu je operativně nejjednodušším prostředkem pro lokalizaci poruch. Určení místa poruchy je provedeno výpočtem na základě přerozdělení netočivé složky proudu. Propojení vývodů vycházejících ze stejné přípojnice není vždy možné, další problém omezující použití této metody je homogenita parametrů vedení. Kvůli členitosti vedení s rozdílnými parametry je téměř nemožné vytvořit správný model pro lokalizaci poruchy. Následnou lokalizaci stěžuje i nestálost parametrů jednotlivých prvků způsobenou atmosférickými a klimatickými vlivy.

Odpínání úseků postiženého vedení

Nejběžnější metodou, která se dodnes používá k lokalizaci postiženého vedení je postupné odpínání úseků, odboček do doby, než dojde k odpojení poruchy. Tímto postupem lze určit místo poruchy. Nevýhodou je nutnost častého přerušení dodávky elektrické energie a obtížné dispečerské operace vedoucí ke správné lokalizaci, proto je snaha tuto metodu postupně nahrazovat.

Indikátory poruch pro venkovní vedení

Princip funkce indikátorů poruch je založen na nepřetržitém měření sumací magnetických elektrických polí všech fázových vodičů a vyhodnocování změn netočivých složek napětí a proudů, které jsou úměrné měřenému elektrickému a magnetickému poli. Porucha je signalizována dle typu pomocí rozpínání kontaktů relé, blikáním signalizačních světel a dálkovou komunikací s dispečinkem. Napájení indikátorů může být provedeno za pomoci fotovoltaického panelu, akumulátorovou baterií nebo přímo z měřeného vedení. Místo poruchy je dohledáno stopováním indikátorů, které indukují poruchové vedení až do místa zemního spojení. Výhodou jsou malé rozměry, snadná instalace bez přerušení dodávky elektrické energie, nižší pořizovací náklady. Nevýhodou naopak nižší citlivost [1].



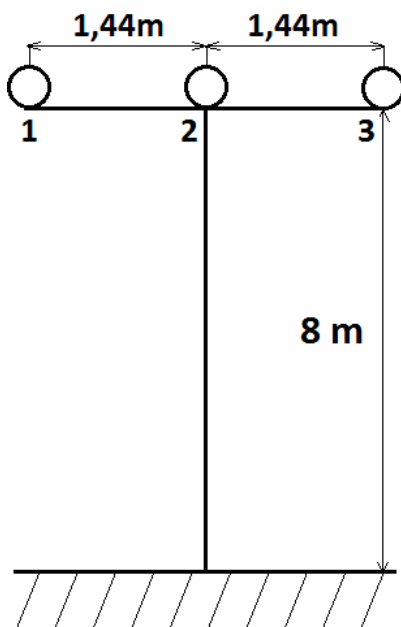
Obr. 32: Indikátor poruchy venkovního vedení [1]

6. PŘÍKLAD VÝPOČTU

Vypočítejte proudové poměry smýšlené vn síti 22 kV s rovinným uspořádáním vodičů při zemním spojení. Navrhněte kompenzaci poruchového kapacitního proudu pomocí zhášecí tlumivky.

Zadané parametry vedení:

Napětí sítě:	$U_N = 22 \text{ kV}$.
Délka všech přípojných vedení:	$l = 200 \text{ km}$.
Výška vedení:	$h = 8 \text{ m}$.
Vzdálenost mezi vodiči:	1,4 m.
Vodič:	lano AlFe 100-AL1/25-ST1A, více příloha D.



Obr. 33: Uspořádání vodičů na vedení 22 kV [1]

6.1 Výpočet parametrů vedení

Indukčnost

$$L_{Cstř} = \frac{1}{3}(L_{C1} + L_{C2} + L_{C3}) = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05$$

$$L_{Cstř} = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{1,44 \cdot 2,88 \cdot 1,44}}{7,3 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = 1,1519 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

Induktivní reaktance

$$X_p = \omega \cdot L_p = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,1519 \cdot 10^{-3} = 0,3619 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Kapacita

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = 8 \text{ m}$$

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} = \sqrt[3]{1,44 \cdot 2,88 \cdot 1,44} = 1,8143 \text{ m}$$

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = \sqrt[3]{\sqrt{(1,44+16)^2} \cdot \sqrt{(2,88+16)^2} \cdot \sqrt{(1,44+16)^2}}$$

$$D_s = 17,9074 \text{ m}$$

$$C_{st\check{r}} = \frac{1}{3}(C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s 2m}{r D_s}} = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s 2m}{r D_s}} = \frac{0,0242}{\log \frac{1,8143 \cdot 2 \cdot 8}{7,3 \cdot 10^{-3} \cdot 17,9074}} =$$

$$C_{st\check{r}} = 0,010313 \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Kapacitní susceptance

$$B_C = \omega \cdot C = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,010313 \cdot 10^{-6} = 3,2399 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$$

Tab. 3: Vypočítané parametry vedení vztažené na kilometr délky

$R \text{ } [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$	$L \text{ } [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}]$	$C \text{ } [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}]$
0,2891	1,1519	0,010313

Tab. 4: Celkové parametry vedení

$R \text{ } [\Omega]$	$L_p \text{ } [\text{H}]$	$C \text{ } [\mu\text{F}]$
57,82	0,23038	2,0626

Kapacitní proud bez zemního spojení

$$I_C = \omega \cdot C \cdot U_f = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,0626 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 8,23 \text{ A}$$

Kapacitní proud v neporušených fázích při zemním spojení:

$$I'_C = I_C \cdot \sqrt{3} = 8,23 \cdot \sqrt{3} = 14,25 \text{ A}$$

Proud zemního spojení poškozené fáze

$$I_P = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot B_C \cdot l = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 3,2399 \cdot 10^{-6} \cdot 22 \cdot 10^3 = 24,69 \text{ A}$$

6.2 Výpočet parametrů tlumivky

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 2,0626 \cdot 10^{-6}} = 1,6374 \text{ H}$$

Výkon zhášecí tlumivky

$$Q = \frac{U_s^2}{3 \cdot \omega \cdot L} = \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,6374} = 313631,3361 \text{ var} = 313,631 \text{ kvar}$$

Proud tekoucí zhášecí tlumivkou

$$I_L = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X_{TL}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot L} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 1,6374} = 24,69 \text{ A}$$

Tab. 5: Vypočítané parametry tlumivky

L [H]	Q [kvar]	I_L [A]
1,6374	313,631	24,69

Návrh tlumivky

Tab. 6: Parametry navržené zhášecí tlumivky

Výkon [kVA]	Rozměry				Hmotnost [kg]
	Typ	Výška	Šířka	Hloubka	
650	ASR 0.63	2220	2160	1220	2350

7. ZÁVĚR

Stěžejní část bakalářské práce se zabývá poruchami, které se za určitých okolností mohou vyskytnout v elektrických sítích hlavně tedy zemním spojením a jeho kompenzací, lokalizaci. O zemním spojení hovoříme tehdy, jedná-li se o vodivé spojení fáze se zemí u sítí izolovaných nebo kompenzovaných. Zásadní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v tom, že zkratový proud je několikanásobně větší než provozní proud a má indukční charakter, zatímco v místě zemního spojení prochází pouze malý proud kapacitního charakteru.

Pro lokalizaci poruchy v kompenzovaných a izolovaných soustavách se využívají dynamické a statické metody. Vzhledem k nevýhodám dynamických lokalizačních metod, jež spočívaly ve vyhodnocení poruchy v krátkém časovém okamžiku, se nejvíce osvědčily statické metody, u níž lze cyklus vyhodnocení opakovat, než dojde k přesné lokalizaci místa poruchy. Nejstarší, ale přitom v některých zemích stále používanou metodou detekce postiženého vývodu je postupné odpínání úseků vedení až do doby, kdy dojde k odpojení poruchy. Kvůli svým nevýhodám se již dnes postupné odpínání úseků nepoužívá, přechází na digitální ochrany využívající některou ze statických metod a automatiky, které jsou schopny jak detekce, tak i následné kompenzace poruchových proudů.

Praktická část práce se zabývá návrhem zhášecí tlumivky pro smyšlenou síť vn 22 kV. Nejprve ze známých parametrů sítě byla určena provozní indukčnost a kapacita vedení vztažená na kilometr délky (tab. 3). Následně byla indukčnost a kapacita přepočtena na celkovou délku vedení (tab. 4). Tlumivka byla zvolena podle nejbližšího vyššího vypočítaného výkonu z katalogu od společnosti EGE. Aby nedošlo k překompenzaci sítě, je nutné tlumivku přesně naladit pomocí pohyblivé části magnetického obvodu. Změna polohy jader tedy změna magnetického obvodu má za následek změnu impedance zhášecí tlumivky a tím docílíme změnu proudového nastavení.

Tato bakalářská práce může sloužit k výukovým účelům.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: AlFe lano [4]	4
Obr. 2: Závěsný kabel [5].....	4
Obr. 3: Tvary vodičů [4]	5
Obr. 4: Jednofázový model vedení s parametry [8]	5
Obr. 5: Dvou vodičové vedení [13].....	9
Obr. 6: Průběh trojfázového proudu [14]	10
Obr. 7: Trojfázové vedení nesymetrické [13]	11
Obr. 8: Jednožilový kabel [2].....	16
Obr. 9: Trojplášťový kabel s olověným pláštěm na každé žíle [6].....	16
Obr. 10: Trojfázový zkrat a), trojfázový zemní zkrat b)	19
Obr. 11: Dvofázový zkrat.....	20
Obr. 12: Dvofázový zemní zkrat	20
Obr. 13: Jednofázový zkrat	20
Obr. 14: Schematické znázornění soustavy v okamžiku 1pólové poruchy [1]	21
Obr. 15: Složkové schéma 1pólové poruchy [1]	22
Obr. 16: Fázorový diagram napětí a proudů v případě vzniku kovového zemního spojení v izolované soustavě [1].....	24
Obr. 17: průběh proudu při vzniku zemního spojení [9].....	25
Obr. 18: Měření netočivé složky napětí a proudu [1].....	26
Obr. 19: Schéma kompenzované sítě přes zhášecí tlumivku [1].....	28
Obr. 20: Zjednodušené schéma zhášecí tlumivky s automatikou přepínání pomocného odporu k výkonovému vinutí [1]	29
Obr. 21: Rezonanční křivka soustavy [1].....	30
Obr. 22: Fázorový diagram napětí a proudů při 1pólovém zkratu, $R_P = 0$ [1].....	31
Obr. 23: Systém RCC [12]	32
Obr. 24: Charakteristika wattmetrického článku.....	34
Obr. 25: Příklad admitanční metody [1].....	35
Obr. 26: Pracovní charakteristika admitanční metody [1].....	36
Obr. 27: Příklad q_u - diagramu, kde vývod q_{0A} je poruchový [1]	37
Obr. 28: Oscilografický průběh postiženého vývodu [1]	38
Obr. 29: Oscilografický průběh zdravého vývodu [1].....	38
Obr. 30: Lokalizace poruchy pomocí indikátorů zkratového proudu [1]	39
Obr. 31: Správná instalace měřicího transformátoru proudu [1].....	39

Obr. 32: Indikátor poruchy venkovního vedení [1].....	40
Obr. 33: Uspořádání vodičů na vedení 22 kV	41

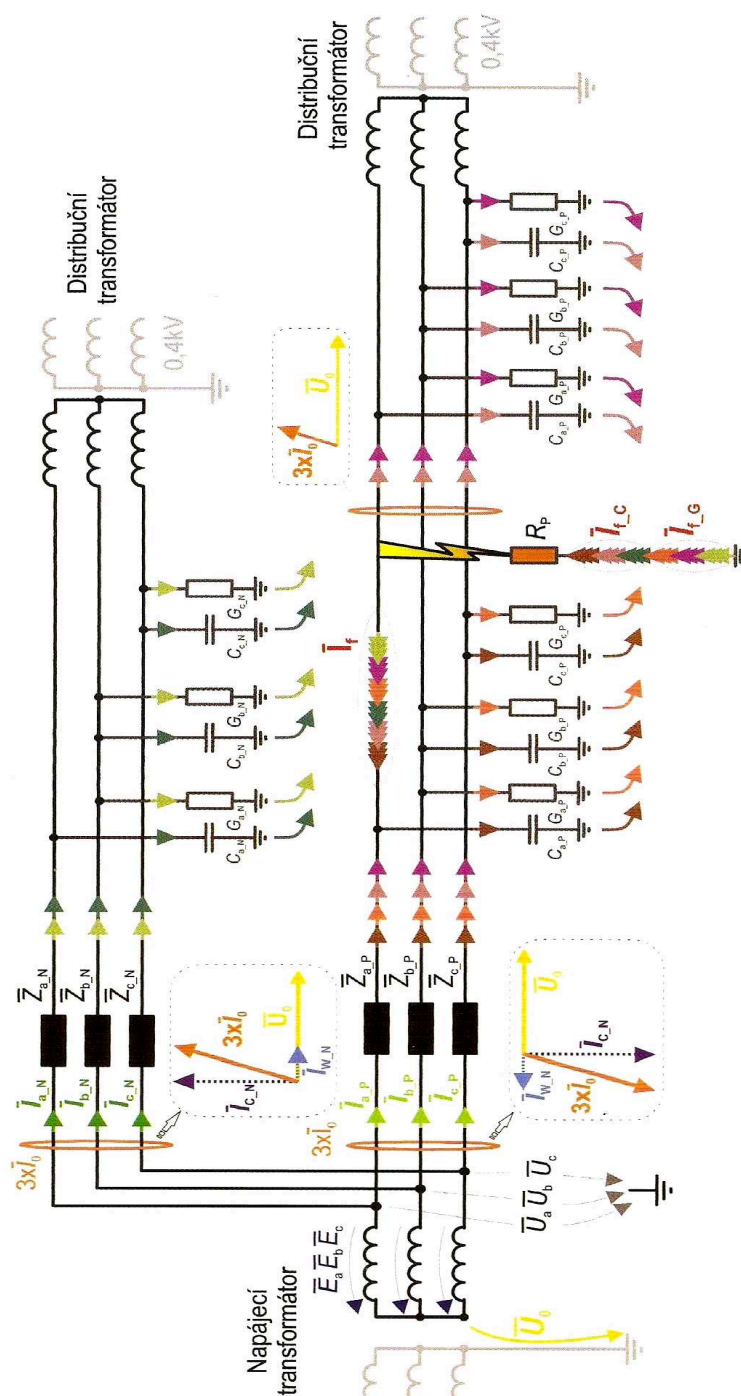
SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnoty rezistance při 20 °C [7]	6
Tab. 2: Teplotní součinitel odporu [7].....	6
Tab. 3: Vypočítané parametry vedení vztažené na kilometr délky	42
Tab. 4: Celkové parametry vedení	42
Tab. 5: Vypočítané parametry tlumivky.....	43
Tab. 6: Parametry navržené zhášecí tlumivky.....	43
Tab. 7: Technické parametry AlFe lana [10]	51
Tab. 8: Zhášecí tlumivky pro trvalý provoz [11]	52
Tab. 9: Zhášecí tlumivky pro krátkodobý provoz [11].....	53

SEZNAM PŘÍLOH

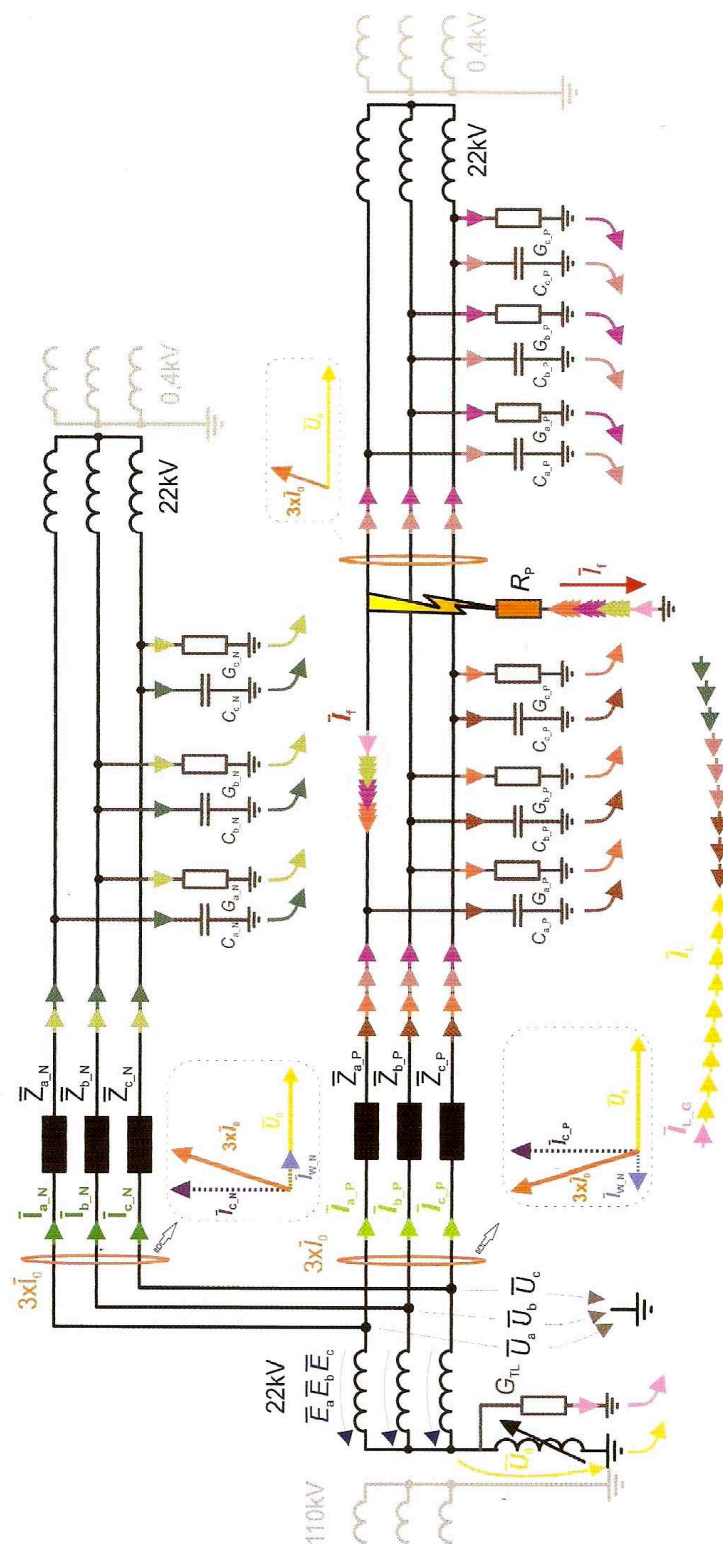
Příloha A:

Schéma izolované soustavy při vzniku 1pólové poruchy [1]



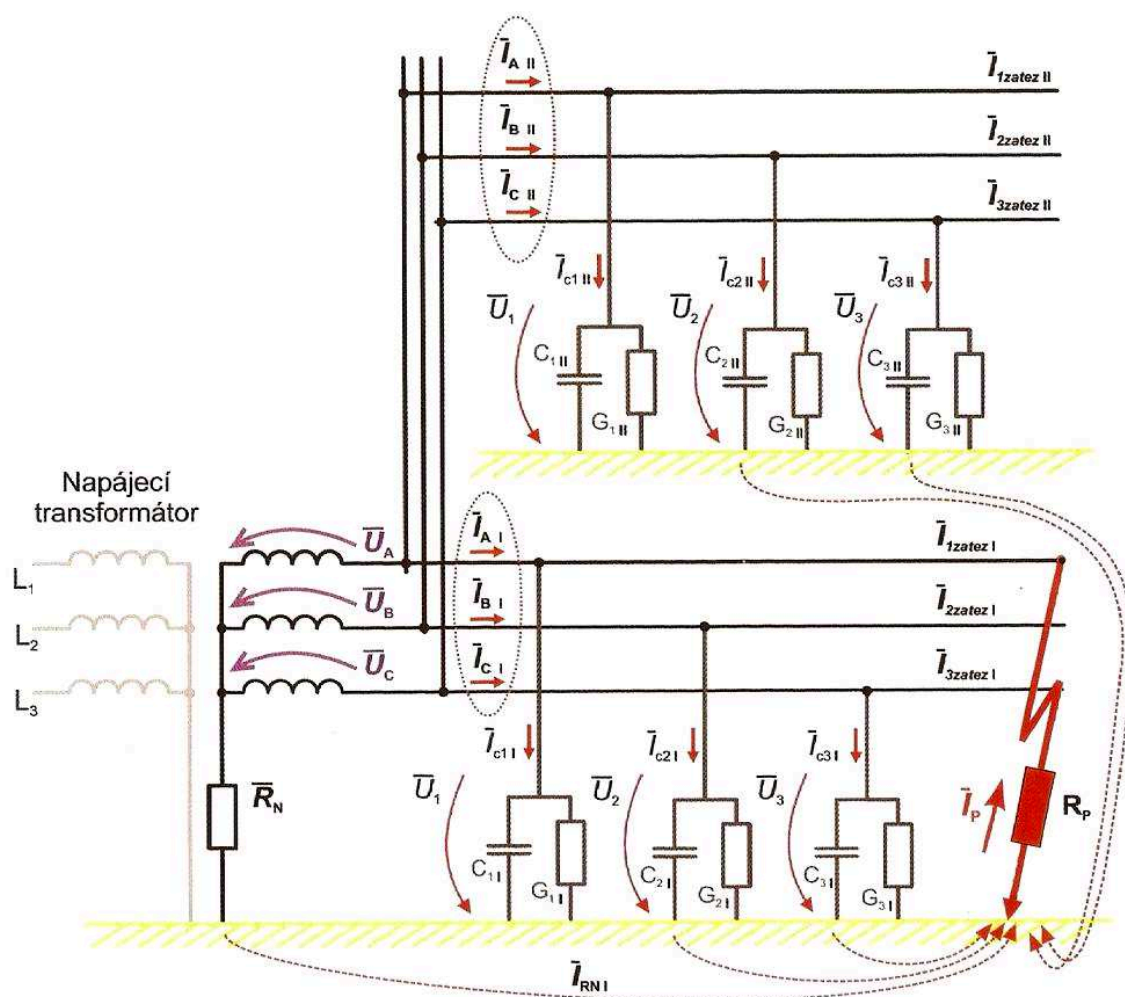
Příloha B:

Schéma kompenzované soustavy při vzniku 1pólové poruchy [1]



Příloha C:

Schematické znázornění soustavy vysokého napětí nepřímou uzemněné přes rezistor [1]



Příloha D:

Parametry AlFe lana 100-AL1/25-ST1A [10]

Tab. 7: Technické parametry AlFe lana [10]

Lano AlFe 100-AL1/25-ST1A	
Průměr lana	14,6 mm
Průřez lana	124,7 mm ²
Hmotnost	469,6 kg·km ⁻¹
Jmenovitý DC odpor při 20°C	0,2891 Ω·km ⁻¹
Jmenovitý DC odpor s duší při 20°C	0,2822 Ω·km ⁻¹
Součinitel délkové roztažnosti	1,77 10 ⁻⁵ K ⁻¹
Jmenovitá pevnost	46,91 kN
Konečný modul pružnosti	81 800 MPa
Konstrukce Al části (počet drátů / Ø drátů)	12+18 / 2,06 mm
Konstrukce Fe části (počet drátů / Ø drátů)	1+6 / 2,12 mm
Průřez Al části	99,99 mm ²
Průřez Fe části	24,71 mm ²
<p>Směr vinutí vrchní vrstvy všech vodičů je pravotočivý (Z).</p> <p>Vysvětlivky označení lana 100-AL1/25-ST1A:</p> <p>100 – průřez drátů AL1 zaokrouhlený na celé číslo</p> <p>AL1 – tvrdě tažený hliník</p> <p>25 – průřez drátů ST1A zaokrouhlený na celé číslo</p> <p>ST1A – pozinkovaný ocelový drát.</p>	

Příloha E:

Parametry zhášecích tlumivek nabízených společnostmi EGE [11]

Tab. 8: Zhášecí tlumivky pro trvalý provoz [11]

Výkon [kVA]	Rozměry				Hmotnost [kg]
	Typ	Výška	Šířka	Hloubka	
200	ASR 0.16	1650	1460	1171	990
650	ASR 0.63	2220	2160	1220	2350
1350	ASR 1.0	2400	1820	1330	2900
1700	ASR 1.6	2510	1810	1492	3800
2100	ASR 2.0	2630	2495	1505	4400
2500	ASR 2.5	2730	2315	1930	4870
4000	ASR 3.2	3015	2420	2130	6000
4700	ASR 4.0	3080	1840	2460	6620
5250	ASR 5.0	3650	2680	1820	8600
7200	ASR 6.3	3810	2550	2310	11210
8000	ASR 8.0	3875	2694	2363	12600
10500	ASR 10	4440	2694	2363	15200

Příloha F:

Parametry zhášecích tlumivek nabízených společnostmi EGE [11]

Tab. 9: Zhášecí tlumivky pro krátkodobý provoz [11]

Výkon [kVA]	Rozměry				Hmotnost [kg]
	Typ	Výška	Šířka	Hloubka	
250	ASR 0.16	1650	1171	1200	990
950	ASR 0.63	2220	1340	1220	1990
1450	ASR 1.0	2400	1382	1390	2500
2100	ASR 1.6	2510	1382	1492	3600
2600	ASR 2.0	2630	1390	1505	3720
3100	ASR 2.5	2730	1390	1530	4160
4500	ASR 3.2	3015	1400	1600	5100
5200	ASR 4.0	3080	1426	1600	5640
6350	ASR 5.0	3650	1770	1820	7400
8700	ASR 6.3	3810	1795	1880	9000
9450	ASR 8.0	3875	1800	1965	11010
12505	ASR 10	4440	1870	2075	14130
1500	ASR 12	4456	2005	2060	15100

LITERATURA

- [1] TOMAN P. a kol. *Provoz distribučních soustav*. 1. vyd. České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] MERTLOVÁ J., NOHÁČOVÁ L. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [3] SANTARIUS P. *Elektrické stanice a vedení*. 2. vyd. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0175-2
- [4] TLUSTÝ J. a kol. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. 1. vyd. České vysoké učení technické v Praze 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [5] *Silové kabely 0,6/1 kV* [online]. Dostupné na WWW: http://www.prakab.cz/fileadmin/content/prakab/Vyroby/Silove_kabely/Silove_kabely_0_6-1kV/1-AYKYZ.pdf
- [6] HODINKA, M., FECKO, Š., NĚMEČEK, F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. SNTL Praha 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [7] MERTLOVÁ, J., HEJTMÁNKOVÁ, P., TAJTL, T. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1. vyd. Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 80-7043-307-8.
- [8] URL <fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vs/vs_prednasky2.pdf>
- [9] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. SNTL/ALFA Praha 1987
- [10] BÁRTA, J., BROUSIL, P. *PNE 34 7509 - Holé vodiče pro venkovní vedení ze soustředěně slaněných kruhových drátů* [online]. Dostupné na WWW: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2034%207509%20Z1.pdf>
- [11] *Zhášecí tlumivky* [online]. Dostupné na WWW: <http://www.ege.cz>
- [12] WINTER, K., The RCC ground fault neutralizer [online]. Dostupné na WWW: http://www.swedishneutral.se/download/gfn_cired_paper.pdf
- [13] KUČERA, D. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně 1982
- [14] RUSEK, S. *Teoretická elektroenergetika*. 1. vyd. VŠB – Technická univerzita Ostrava 1999. ISBN 80-7078-715-5.